

## **POLARIZER AND MICROLITHOGRAPHY PROJECTION SYSTEM WITH A POLARIZER**

This is a Continuation-in-Part Application of pending prior Application No. 10/151,867, filed May 22, 2002, of Karl-Heinz SCHUSTER entitled POLARIZER AND MICROLITHOGRAPHY PROJECTION SYSTEM WITH A POLARIZER, which, in turn, claims priority from German Patent Application No. 101 24 803.2, filed on May 22, 2001.

### **Polarisationsoptisch wirksame Verzögerungsanordnung und Mikrolithografie-Projektionsbelichtungsanlage damit**

5

Dies ist eine Continuation-In-Part-Anmeldung zu der US-Patent-anmeldung mit Serial-Nr. 10/151,867 und Veröffentlichungsnummer US 002/0176166 A1, die am 22. Mai 2002 eingereicht wurde und die die Priorität der deutschen Patentanmeldung DE 101 24 803.2 vom  
10 22. Mai 2001 in Anspruch nimmt.

### **HINTERGRUND DER ERFINDUNG**

#### **Gebiet der Erfindung**

- 15 Die Erfindung betrifft eine Verzögerungsanordnung zur Umwandlung eines von einer Eingangsseite der Verzögerungsanordnung auftretenden Eingangsstrahlungsbündels in ein Ausgangsstrahlungsbündel, welches über seinen Querschnitt eine durch die Verzögerungsanordnung beeinflussbare räumliche Verteilung von Polarisationszuständen  
20 aufweist, die sich von der räumlichen Verteilung von Polarisationszuständen des Eingangsstrahlungsbündels unterscheidet, sowie auf

eine Mikrolithografie-Projektionsbelichtungsanlage mit mindestens einer solchen Verzögerungsanordnung.

Beschreibung des verwandten Standes der Technik

- 5 Zur Steigerung der Abbildungsleistung von Projektionsbelichtungsanlagen für die Mikrolithografie ist häufig eine gezielte Einstellung von Polarisationszuständen innerhalb des Beleuchtungssystems und/oder bei dem Projektionsobjektiv vorteilhaft. Beispielsweise kann es sein, dass sich ein durch die Strahlung der primären Lichtquelle bereitgestellter Polarisationszustand beim Durchtritt durch die Projektionsbelichtungsanlage in ungewollter und schwer kontrollierbarer Weise verändert. Hierzu kann beispielsweise intrinsische Doppelbrechung (IDB) oder durch mechanische Spannungen verursachte Spannungsdoppelbrechung (SDB) in Kalziumfluorid ( $\text{CaF}_2$ ) und anderen für transparente optische Komponenten im tiefen Ultraviolettbereich (DUV) verwendbaren Materialien beitragen. Ebenso können Antireflexbeschichtungen und Reflexbeschichtungen (Spiegelschichten) den Polarisationszustand der Strahlung ungünstig verändern, so dass beispielsweise ein linearer Polarisationszustand am Eingang des Beleuchtungssystems in einen undefinierten elliptischen Polarisationszustand am Austritt des Projektionsobjektivs überführt wird. Da die polarisationsoptische Wirkung der Komponenten in der Regel nicht überall gleich ist, ist in der Regel auch der Ausgangspolarisationszustand über den Querschnitt des Strahlungsbündels nicht konstant. Gattungsgemäße Verzögerungsanordnungen können zu einer Kompensation derartiger Effekte beitragen.

- Der Polarisationszustand der zur Bilderzeugung genutzten Strahlung wird häufig auch gezielt beeinflusst, um die Abbildungsqualität zu verbessern. Hierzu können gattungsgemäße Verzögerungsanordnungen im Beleuchtungssystem und/oder im Projektionsobjektiv eingesetzt werden.

- Aus der DE 195 35 392 (entsprechend EP 0 764 858 B1) ist eine gattungsgemäße Verzögerungsanordnung bekannt, die für den Einsatz im Beleuchtungssystem einer im tiefen Ultraviolettbereich arbeitenden Projektionsbelichtungsanlage vorgesehen ist und ein Ausgangsstrahlungs**5** bündel erzeugt, das über seinen gesamten Querschnitt im wesentlichen in radialer Richtung polarisierte Strahlung enthält. Die radiale Polarisation ist für Objektive mit typischer bildseitiger numerischer Apertur (NA) von ca.  $0,5 \leq NA \leq 0,7$  und Photoresist ohne Antireflexbeschichtung gut geeignet, um die Effizienz der Einkopplung in das
- 10** Resistmaterial zu optimieren. Tangentiale Polarisation, bei der die lokale Polarisationsvorzugsrichtung im wesentlichen senkrecht zur Radialrichtung des Strahlbündels steht, wird häufig zur Optimierung der Zweistrahlint interferenz bei höchst numerischen Aperturen bevorzugt, und kann ebenfalls durch geeignete Verzögerungsanordnungen eingestellt
- 15** werden. Eine in Transmission wirksame Ausführungsform zur Umwandlung von linear polarisierter Eingangsstrahlung in radial polarisierte Ausgangsstrahlung hat eine Vielzahl flächenfüllend angeordneter sechseckiger Halbwellenplatten aus doppelbrechendem Material, deren kristallografische Hauptachsen senkrecht zur Einfallsrichtung der
- 20** Eingangsstrahlung so ausgerichtet sind, dass jede Halbwellenplatte die Polarisationsrichtung der lokal einfallenden Strahlung in Richtung eines die Halbwellenplatte durchschneidenden, auf die optische Achse der Verzögerungsanordnung gerichteten Radius umlenkt.
- 25** Aus der DE 101 24 803 (entsprechend US 2002/0176166 A1) ist eine für vergleichbare Zwecke vorgesehene, in Transmission wirksame Verzögerungsanordnung bekannt, die bei einer Ausführungsform aus einer transparenten Platte aus doppelbrechendem Material besteht, auf deren Eintrittsseite und Austrittsseite jeweils kleine Bereiche mit ablenkenden
- 30** Strukturen in Form von Gittern oder von refraktiven Strukturen vorliegen. Die kristallografische Hauptachse des doppelbrechenden Plattenmaterials ist parallel zur optischen Achse der Verzögerungsanordnung und

damit im wesentlichen parall | zur Einstrahlrichtung des Eingangsstrahlungsbündels ausgerichtet. Die ablenkenden Strukturen erzeugen einen schiefen Strahlungsdurchtritt durch das Plattenmaterial. Durch lokal variierende Einstellung geeigneter Neigungswinkel zwischen der

5 Durchtrittsrichtung und der kristallografischen Hauptachse sowie geeigneter Neigungsrichtungen und Plattendicken können z.B. aus eintretendem zirkular oder linear polarisiertem Licht Ausgangsstrahlungsbündel mit zylindersymmetrischer Polarisationsverteilung (tangential oder radial) erzeugt werden.

10

Die noch nicht veröffentlichte deutsche Patentanmeldung DE 103 24 468.9 der Anmelderin beschreibt mikrolithografische Projektionsbelichtungsanlagen, in denen zum Einstellen eines gewünschten Polarisationszustandes der Strahlung transparente Verzögerungselemente verwen-

15 det werden, die formdoppelbrechende Gitterstrukturen haben, deren Anordnung über deren Nutzquerschnitt lokal variiert.

#### ZUSAMMENFASSUNG DER ERFINDUNG

20

Es ist eine Aufgabe der Erfindung, eine Verzögerungsanordnung der eingangs erwähnten Art bereitzustellen, deren Verwendung eine besonders günstige Konstruktion der damit ausgestatteten optischen Systeme erlaubt. Es ist eine andere Aufgabe, Verzögerungsanordnungen bereitzustellen, die in Lithographiesystemen für extremes Ultraviolettlicht (EUV)

25 verwendbar sind.

Zur Lösung dieser und anderer Aufgaben stellt die Erfindung gemäß einer Formulierung eine Verzögerungsanordnung zur Umwandlung eines

30 von einer Eingangsseite der Verzögerungsanordnung auftreffenden Eingangsstrahlungsbündels in ein Ausgangsstrahlungsbündel bereit, welches über seinen Querschnitt eine durch die Verzögerungsanord-

nung beeinflussbare räumliche Verteilung von Polarisationszuständen aufweist, die sich von der räumlichen Verteilung von Polarisationszuständen des Eingangsstrahlungsbündels unterscheidet, wobei die Verzögerungsanordnung als reflektive Verzögerungsanordnung ausgebildet ist und ein Nutzquerschnitt der Verzögerungsanordnung eine Vielzahl von Verzögerungsbereichen unterschiedlicher Verzögerungswirkung hat.

Eine solche Spiegelanordnung mit ortsabhängig variierender Verzögerungswirkung kann beispielsweise zur Kompensation von unerwünschten Schwankungen des Polarisationszustandes über den Querschnitt eines Eingangsstrahlungsbündels genutzt werden, um ein Ausgangsstrahlungsbündel mit einer über seinen Querschnitt weitgehend einheitlichen Polarisation zu erzeugen. Es kann auch dazu genutzt werden, in den einzelnen Verzögerungsbereichen lokal unterschiedliche Polarisationszustände einzustellen, um beispielsweise ein Ausgangsstrahlungsbündel mit radialer Polarisation oder tangentialer Polarisation zu erzeugen. Auch eine Kombination aus Polarisationskompensation und gezielter Einstellung einer ortsabhängig variierenden Polarisationszustandsverteilung der Ausgangsstrahlung ist möglich.

Durch die Gestaltung als reflektive Verzögerungsanordnung ist es möglich, optische Systeme mit gefalteten Strahlengängen aufzubauen, bei denen der Eingriff in den Polarisationszustand der Strahlung im Bereich der Faltung erfolgt. Ausführungsformen für im wesentlichen senkrechten Strahlungseinfall, bei denen die Richtung des Eingangsstrahlbündels im wesentlichen gegenparallel zur Richtung des Ausgangsstrahlbündels verläuft, sind ebenso möglich wie Verzögerungsanordnungen für einen nicht-senkrechten Einfall, bei denen das Eingangsstrahlbündel und das Ausgangsstrahlbündel im Winkel zueinander schräg zu einer optischen Achse der Verzögerungsanordnung verlaufen.

Reflektive Verzögerungsanordnungen können beispielsweise nach Art von Umlenkspiegeln zur Lösung von Bauraumproblemen beitragen und ermöglichen alternative Herstellungsmethoden. Konkavspiegelanordnungen mit ortsauflösend variierender Verzögerungswirkung für katadioptrische Projektionsobjektive oder andere Abbildungssysteme sind ebenfalls möglich.

Gemäß einer Weiterbildung umfasst die Verzögerungsanordnung mindestens ein transparentes doppelbrechendes Transmissionselement und einen Spiegel mit einer Spiegelfläche, die an einer der Eintrittsseite der Verzögerungsanordnung gegenüber liegenden Seite des Transmissionselementes derart angeordnet ist, dass die Eingangsstrahlung nach einem ersten Durchtritt durch das Transmissionselement für einen zweiten Durchtritt durch das Transmissionselement rückreflektiert wird. Das doppelbrechende Transmissionselement kann dadurch im zweimaligen Durchtritt genutzt werden, so dass im Vergleich zu einem einmaligen Durchtritt höhere Verzögerungen, d.h. größere Gangunterschiede der senkrecht zueinander polarisierten Feldkomponenten der Strahlung, erzielt werden können.

Die Spiegelfläche kann unmittelbar an einer der Eintrittsseite der Verzögerungsanordnung gegenüberliegenden Austrittsseite des Transmissionselementes angeordnet sein, so dass die Verzögerungsanordnung nach Art eines Rückflächenspiegels aufgebaut sein kann. Es gibt auch Ausführungsformen, bei denen zwischen einer Austrittsfläche des Transmissionselementes und der Spiegelfläche ein Abstand besteht. Ein Zwischenraum zwischen Transmissionselement und Spiegelfläche kann materialfrei oder mit einem transparenten Material mindestens teilweise gefüllt sein, um beispielsweise Inzidenzwinkel zu verringern und/oder Phasenfehler auszugleichen. Die Spiegelfläche und/oder das Trans-

missionselement können eben oder gekrümmt sein, z.B. konkav gekrümmt.

Um sicher zu stellen, dass die polarisationsverändernden Eigenschaften der Verzögerungsanordnung weitgehend oder ausschließlich durch die Eigenschaften des doppelbrechenden Transmissionselementes bestimmt werden, sollten die Reflexionseigenschaften der Spiegelfläche so ausgelegt sein, dass der Reflexionsgrad und gegebenenfalls eine phasenverzögernde Wirkung für senkrecht und parallel zu einer Einfallsebene polarisierte Strahlung im wesentlichen gleich sind. Sofern der Spiegel selbst eine Verzögerungswirkung auf die reflektierte Strahlung ausübt, sollte bei der Auslegung des doppelbrechenden Transmissionselementes darauf geachtet werden, dass dessen Verzögerungseigenschaften an die Verzögerungswirkung des Spiegels angepasst ist, um insgesamt die gewünschte, ortsabhängig variierende Verzögerungswirkung zu erzielen.

Es gibt im Rahmen der Erfindung verschiedene Möglichkeiten, ein doppelbrechendes Transmissionselement zu realisieren. Dabei können insbesondere Volumen-Polarisationseffekte, wie die Doppelbrechung einachsiger und zweiachsiger Kristalle, die intrinsische Doppelbrechung (IDB) und/oder die durch mechanische Spannungen induzierte Spannungsdoppelbrechung (SDB) zur Erzeugung von Phasenverzögerungen genutzt werden.

Bei einer Ausführungsform umfasst das doppelbrechende Transmissionselement eine Vielzahl von nebeneinander angeordneten Verzögerungselementen aus transparentem doppelbrechenden Material, wobei jedes der Verzögerungselemente eine axiale Dicke (gemessen parallel zur optischen Achse der Verzögerungsanordnung) und eine in einem bestimmten Neigungswinkel zu einer Durchstrahlungsrichtung liegende kristallografische Hauptachse hat, wobei die axiale Dicke und

der Neigungswinkel zur Erzeugung eines vorgebbaren Gangunterschiedes zwischen senkrecht zueinander ausgerichteten Feldkomponenten der Strahlung bei zweifachem Durchtritt durch das Verzögerungselement ausgelegt sind.

5

Eine Variante zeichnet sich dadurch aus, dass die kristallografischen Hauptachsen der Verzögerungselemente in verschiedenen Richtungen senkrecht zur optischen Achse der Verzögerungsanordnung ausgerichtet sind. Für Ausführungsformen, die für im wesentlichen senkrechten

10 Strahlungseinfall (Strahlungseinfall im wesentlichen parallel zur optischen Achse der Verzögerungsanordnung) ausgelegt sind, kann das doppelbrechende Transmissionselement im wesentlichen so aufgebaut sein wie in der DE 195 35 292 gezeigt. Der Offenbarungsgehalt der

15 gemacht. Da jedoch bei reflektiven Verzögerungsanordnungen der hier beschriebenen Art ein zweifacher Durchtritt der Strahlung durch das transparente doppelbrechende Material auftritt, kann die axiale Dicke der Verzögerungselemente gegenüber den dort gezeigten Ausführungsformen reduziert, z.B. halbiert, werden. Verzögerungsanordnungen  
20 höherer Ordnung (z.B. mit Phasenverzögerungen von mehr als einer Arbeitswellenlänge) sind ebenfalls möglich und können entsprechend dicker sein.

Bei einer anderen Ausführungsform ist mindestens ein doppelbrechendes Transmissionselement vorgesehen, das eine kristallografische  
25 Hauptachse und eine axiale Dicke hat, wobei der Nutzquerschnitt, d.h. der beleuchtete Querschnitt der Verzögerungsanordnung, in eine Vielzahl von Verzögerungsbereichen aufgeteilt ist. Mindestens einer der Verzögerungsbereiche ist so ausgebildet, dass die Durchtrittsrichtung  
30 der Strahlung durch das doppelbrechende Transmissionselement in dem Verzögerungsbereich derart schief zur Richtung der kristallografischen Hauptachse des Verzögerungsbereiches verläuft, dass die



Durchtrittsrichtung mit der kristallografischen Hauptachse einen Neigungswinkel von mehr als  $0^\circ$  und weniger als  $90^\circ$  einschließt. Die Durchtrittsrichtung und die Richtung der kristallografischen Hauptachse spannen eine Durchtrittsebene auf. Für den mindestens einen Verzögerungsbereich sind die axiale Dicke und der Neigungswinkel derart aneinander angepasst, dass eine optische Weglängendifferenz der Feldkomponenten in dem Verzögerungsbereich nach zweifachem Durchtritt durch das Verzögerungselement einem vorgegebenen Gangunterschied entspricht und die Orientierung der Durchtrittsebene für jeden Verzögerungsbereich so eingestellt ist, dass sich die für den Verzögerungsbereich lokal gewünschte Polarisationsvorzugsrichtung ergibt. Vorzugsweise ist jeder der Verzögerungsbereiche auf diese Weise ausgebildet.

Die Verzögerungsanordnung wirkt in jedem ihrer schief durchstrahlten Verzögerungsbereiche wie eine Verzögerungsplatte, bei der sich im einfachen Durchtritt der Gangunterschied  $G$  gemäß  $G = W \times |n_{ao} - n_o|$  aus dem Produkt der in Durchtrittsrichtung durchlaufenen Weglänge  $W$  zwischen Eintritt und Austritt und dem Betrag der Differenz der Brechungsindizes  $n_o$  und  $n_{ao}$  für die beiden senkrecht zueinander polarisierten Feldkomponenten (ordentlicher Strahl und außerordentlicher Strahl) ergibt. Diese Differenz ist somit abhängig von der Orientierung des Brechungsindexellipsoides. Dabei ist die den Gangunterschied mitbestimmende Brechzahldifferenz der Feldkomponenten vom Neigungswinkel  $NW$  und von der Art des doppelbrechenden Materials abhängig und kann durch Wahl des Neigungswinkels eingestellt werden. Wenn der Strahl in sich reflektiert wird, ergibt sich im doppelten Durchtritt im wesentlichen der doppelte Gangunterschied.

Wird beispielsweise ein kleiner Neigungswinkel zur Kristallografische Hauptachse eingestellt, so ist die Brechzahldifferenz, welche in Richtung der kristallografischen Hauptachse verschwindet, relativ klein, so daß zur Erzielung eines gewünschten Gangunterschiedes die axiale Dicke

- entsprechend groß gewählt werden kann. Dies erleichtert die Fertigung und das Handling erfindungsgemäßer Verzögerungsanordnungen, die gegebenenfalls als freitragende Komponenten ausgeführt sein können. Über die Wahl der axialen Dicke kann die Wirkungsweise der
- 5 Verzögerungsanordnung an den Polarisationszustand der einfallenden Strahlung und die gewünschte Polarisationsverteilung der Ausgangsstrahlung angepaßt werden. Wird beispielsweise ein Gangunterschied (im doppelten Durchtritt) von einem Viertel der Lichtwellenlänge (oder einem ungeradzahligen Vielfachen davon) eingestellt, so ist durch jeden der
- 10 Verzögerungsbereiche eintretende zirkular polarisierte Strahlung in austretende linear polarisierte Strahlung umwandelbar. Über die Neigungsrichtung ist für jeden Verzögerungsbereich die Ausrichtung der Polarisationsvorzugsrichtung in der auf der Eintrittsseite der Verzögerungsanordnung liegenden Austrittsebene einstellbar, beispielsweise in
- 15 tangentialer oder radialer Richtung zur optischen Achse der Verzögerungsanordnung. Bei Einstellung eines Halbwellen-Gangunterschiedes (oder einem ungeradzahligen Vielfachen davon) nach zweifachem Durchtritt ist eine lokale Drehung von einfallende linear polarisierter Strahlung in austretende linear polarisierte Strahlung möglich. Diese kann
- 20 durch geeignete lokale Einstellung der Neigungsrichtung in den Verzögerungsbereichen z.B. in jedem Verzögerungsbereich radial oder tangential zur optischen Achse ausgerichtet sein. Eine über den gesamten Nutzquerschnitt im wesentlichen einheitlich ausgerichtete Linearpolarisation ist ebenfalls möglich. Dabei ist zu beachten, dass im
- 25 allgemeinen eine Winkelabhängigkeit der Verzögerungswirkung vorliegt.

- Eine vorteilhafte Weiterbildung zeichnet sich dadurch aus, daß ein doppelbrechendes Transmissionselement mit einer im wesentlichen parallel zur optischen Achse der Verzögerungsanordnung ausgerichteten
- 30 kristallografischen Hauptachse vorgesehen ist und daß dem doppelbrechenden Transmissionselement für jeden Verzögerungsbereich mindestens eine ablenkende Struktur zugeordnet ist, die die einfallende

Strahlung so ablenkt, daß diese mit dem für den Verzögerungsbereich vorgesehene Neigungswinkel und der Neigungsrichtung den Verzögerungsbereich durchdringt. Mit einem einzigen den Querschnitt der Verzögerungsanordnung füllenden doppelbrechenden Transmissions-  
5 element ist somit eine Verzögerungsanordnung mit einfachem Aufbau möglich, die besonders leicht herstellbar ist.

- Um einen Strahlungsausstritt parallel zum Strahlungseintritt zu ermöglichen, sind vorzugsweise auf einer Eingangsseite des doppelbrechenden  
10 Transmissionselementes ablenkende Strukturen zur Ablenkung der einfallenden Strahlung in die schiefe Durchtrittsrichtung und auf der Austrittsseite zugeordnete ablenkende Strukturen zur Rückgängigmachung der Ablenkung vorgesehen. Beispielsweise kann das doppelbrechende Transmissionselement durch eine planparallele Platte aus  
15 Magnesiumfluorid oder Quarzkristall gebildet sein, auf deren Eintrittsseite und/oder Austrittsseite die ablenkenden Strukturen in Form entsprechend strukturierter Oberflächenbereiche erzeugt sind. Auf diese Weise ist eine mit einem einzigen optisch wirksamen Transmissionslement aufgebaute Verzögerungsanordnung möglich, die im wesentlichen die Form einer  
20 dünnen Platte haben und somit auch bei beschränktem Bauraum an geeigneter Stelle innerhalb einer Projektionsbelichtungsanlage eingebaut werden kann, z.B. im Bereich kleiner Strahlwinkel nahe bei oder in einer Pupillenebene.
- 25 Die ablenkenden Strukturen jedes Verzögerungsbereiches dienen dazu, die in den Verzögerungsbereich einfallende Strahlung in die für diesen Verzögerungsbereich vorgesehene Durchtrittsrichtung umzulenken bzw. diese Umlenkung rückgängig zu machen. Es kann sich dabei um eine beugende Struktur, beispielsweise nach Art eines linearen Gitters, um  
30 eine brechende Struktur, beispielsweise nach Art einer Fresnel-Oberfläche, oder um eine Struktur handeln, bei der sowohl Lichtbeugung als

auch Brechung zur Ablenkung beitragen, beispielsweise nach Art eines geblazeden Gitters. Auch holographische Strukturen sind möglich.

Die zugeordnete Spiegelschicht kann in einem Abstand hinter der Austrittsseite des Transmissionselementes angeordnet sein, z.B. an einem gesonderten Spiegel. Sie kann auch direkt an der Austrittsseite des Transmissionselementes angebracht sein, z.B. in Form einer dünnen Reflexionsbeschichtung.

- 10 Es ist zweckmäßig, den beleuchteten Nutzquerschnitt in kleine Felder bzw. Bereiche konstanter Ablenkung aufzuteilen, beispielsweise in kleine Sechseck-Bereiche, die den gesamten beleuchteten Querschnitt der Verzögerungsanordnung mehr oder weniger lückenlos ausfüllen. Auch andere, vorzugsweise vieleckige Bereichsformen, z.B. Quadrate oder
- 15 Dreiecke sind möglich. Verzögerungsbereiche können auch ringförmig oder ringsegmentförmig oder kreissegmentförmig gestaltet sein. Die Anzahl der Bereiche oder Felder liegt bevorzugt in der Größenordnung von 10 oder 100 oder darüber, so daß die Bereiche bevorzugt typische mittlere Querschnittsflächen von weniger als 10%, insbesondere zwischen 10% und 1% der Gesamtfläche des Nutzquerschnitts haben. Die
- 20 Größe der Bereiche kann dabei der für den Anwendungsfall zulässigen Richtungstoleranz der lokal gewünschten Polarisationsvorzugsrichtung angepaßt werden. Diese liegt bei bevorzugten Ausführungsformen im Bereich von  $\pm 2\%$  oder darunter. Durch kleinere Bereichsgrößen kann
- 25 eine fast stufenlose Verteilung der gewünschten lokalen radialen oder tangentialen Polarisation erzielt werden. Auch ein kontinuierlicher Übergang der Strukturen ohne definierte Bereichsgrenzen ist möglich. Ebenso ist es möglich, daß zwischen den wirksamen Verzögerungsbereichen kleine Lücken bleiben, die besonders bei Einsatz der Verzögerungsanordnung im Beleuchtungssystem tolerierbar sind.
- 30

Bei Ausführungsformen erfindungsgemäßer Verzögerungsanordnungen, die für einen schrägen Strahlungseinfall vorgesehen sind, sollte darauf geachtet werden, dass die axiale Dicke des doppelbrechenden Transmissionselementes und die laterale Ausdehnung der Verzögerungsbereiche derart an den Einfallswinkel der Eingangsstrahlung angepasst sind, dass ein überwiegender Anteil der in einen Verzögerungsbereich eintretenden Strahlung auch wieder aus dem gleichen Verzögerungsbereich austritt und nicht benachbarte Verzögerungsbereiche durchstrahlt. Dadurch können Störungen in den Grenzbereichen zu benachbarten Verzögerungsbereichen bei schrägem Einfall vermindert oder vermieden werden. Hierzu ist es günstig, wenn eine laterale Ausdehnung der Verzögerungselemente groß gegen die axiale Dicke des doppelbrechenden Transmissionselementes ist. Das Verhältnis zwischen lateraler Ausdehnung und axialer Dicke der Verzögerungselemente kann beispielsweise mehr als 50 oder mehr als 100 oder mehr als 1.000 oder mehr als 10.000 betragen.

Eine andere Klasse erfindungsgemäßer Verzögerungsanordnungen zeichnet sich dadurch aus, daß im Querschnitt der Verzögerungsanordnung mehrere doppelbrechende Transmissionselemente vorzugsweise flächenfüllend angeordnet sind, wobei bei jedem der doppelbrechenden Transmissionselemente die kristallografische Hauptachse schief gegenüber der optischen Achse der Verzögerungsanordnung so gekippt ist, daß sich für den Bereich der gewünschten Neigungswinkel und die Neigungsrichtung ergibt. Es handelt sich hier also um mehrteilig aufgebaute, segmentierte Verzögerungsanordnungen, deren Aufbau ähnlich sein kann wie derjenige, der in Fig. 1 der DE 195 35 392 gezeigten Ausführungsformen, jedoch mit dem Unterschied, daß bei den hier betrachteten Verzögerungsanordnungen die kristallografische Hauptachsen der Verzögerungsbereiche schräg zur optischen Achse der Verzögerungsanordnung und zur Plattenebene ausgerichtet sind.

Bei einer anderen Ausführungsform hat die Verzögerungsanordnung ein Substrat (Träger) und eine an d m Substrat angeordnete Reflexionsbeschichtung, wobei die Reflexionsbeschichtung zur Bildung von Verzögerungsbereichen unterschiedlicher Verzögerungswirkung eine lokal

5 variierende, polarisationsverändernde Reflexionswirkung hat. Eine solche Reflexionsbeschichtung mit ortsabhängig variierenden polarisationsverändernden Eigenschaften kann beispielsweise direkt auf einer der Eintrittsseite der Verzögerungsanordnung zugewandten Vorderseite des Substrates aufgebracht sein (Vorderflächenspiegel).

10

Bei einer Ausführungsform ist die Reflexionsbeschichtung als anisotrope Reflexionsbeschichtung mit einer örtlichen Variation der Anisotropie der Reflexionsbeschichtung ausgestaltet. Die Variation der Anisotropie kann die Richtung und/oder den Absolutbetrag einer durch die Beschichtung

15 erzeugten Phasenaufspaltung der auftreffenden Strahlung beeinflussen.

20

Die anisotrope Reflexionsbeschichtung kann nach Art eines dielektrisch verstärkten Metallspiegels ausgestaltet sein. Bei einer Ausführungsform ist auf dem Träger eine Metallschicht aufgebracht, auf der eine anisotrope dielektrische Schicht aus mindestens einem transparenten dielektrischen Material mit einer oder mehreren Einzellagen aufgebracht ist. Auch anisotrope dielektrische Mehrlagen-Reflexionsbeschichtungen ohne Metallschicht sind möglich.

25

Die örtliche Verteilung der Verzögerungswirkung kann so ausgelegt sein, dass sich eine effektive Doppelbrechungsverteilung (Verzögerungsverteilung) ergibt, die im wesentlichen rotationssymmetrisch zur optischen Achse der Verzögerungsanordnung ist. Es kann auch eine effektive Doppelbrechungsverteilung eingestellt werden, die eine in

30 Radialrichtung zunehmende oder abnehmende Doppelbrechung hat. In manchen Fällen, beispielsweise zur Kompensation von Polarisations-effekten, die durch intrinsische Doppelbrechung von Fluoridkristallen

entstehen, kann es vorteilhaft sein, wenn die Doppelbrechungsverteilung nicht-rotationssymmetrisch ist. Beispielsweise kann eine azimutale Modulation der Stärke der Doppelbrechung vorgesehen sein, die vorzugsweise in bezug auf die optische Achse der Verzögerungsanordnung eine mehrzählige Symmetrie aufweist, insbesondere eine 2-zählige, 3-zählige, 4-zählige oder 6-zählige Symmetrie. In diesem Fall können die Verzögerungsbereiche nach Art von Kreissegmenten entsprechender Winkelausdehnung gestaltet sein. Die Verzögerungsbereiche können auch nach Art benachbarter Zellen mit polygonaler Form (z.B. hexagonal, dreieckig, rechteckig) mit zwischenliegenden Lücken oder flächenfüllend nebeneinander angeordnet sein.

Zur Herstellung anisotroper dielektrischer Schichten kann das Beschichtungsmaterial auf mindestens einen Bereich der Substratoberfläche unter einem großen Belegungswinkel aufgebracht werden, beispielsweise durch Aufdampfen unter großen Aufdampfwinkeln von  $40^\circ$  oder mehr. Zur Erzeugung geeignet dimensionierter und geformter Verzögerungsbereiche können Maskierungstechniken mit Abschattungsblenden bei der Beschichtung genutzt werden.

Ein bevorzugtes Anwendungsgebiet der Erfindung sind Projektionsbelichtungsanlagen für die Mikrolithografie, bei denen elektromagnetische Strahlung aus dem Ultraviolettbereich insbesondere mit Wellenlängen von weniger als 260 nm genutzt wird (beispielsweise 248 nm, 193 nm oder 157 nm). Die bisher beschriebenen Ausführungsformen sind für diese Wellenlänge besonders geeignet, da transparente Materialien sowohl zur Herstellung doppelbrechender Transmissionselemente als auch zur Herstellung von dielektrischen Interferenzschichten verfügbar sind. Die Erfindung ist jedoch nicht auf diese Wellenlängen beschränkt, sondern kann auch bei Strahlung aus dem extremen Ultraviolettbereich (EUV) genutzt werden, wobei beispielsweise Strah-

lung mit ca. 13 nm Wellenlänge in rein reflektiven Projektionssystemen für die Mikrolithografie genutzt wird.

Bei einer Ausführungsform hat die Verzögerungsanordnung ein Substrat  
5 und eine an dem Substrat angebrachte, für Strahlung aus dem extremen Ultraviolettbereich (EUV) wirksame Reflexionsbeschichtung, die zur Bildung von Verzögerungsbereichen unterschiedlicher Verzögerungswirkung eine lokal unterschiedliche polarisationsveränderte Reflexionswirkung hat. Die Reflexionsbeschichtung kann als Mehrlagen-Reflexbeschichtung mit übereinanderliegenden Schichten geeigneter Materialien  
10 (beispielsweise Molybdän und Silizium) ausgebildet sein.

Die Mehrlagen-Reflexbeschichtung kann in der Nähe des Spiegel-  
substrats wie ein konventioneller EUV-Multischichtspiegel aufgebaut sein.  
15 Zur Erzeugung einer polarisationsabhängigen Phasentransmission kann auf dieser Schichtanordnung eine Gitteranordnung von schmalen, mit Abstand nebeneinander verlaufenden Strukturen vorgesehen sein, die ebenfalls in sich mehrlagig aufgebaut sind und beispielsweise die Schichtfolge des darunter liegenden Spiegels fortsetzen. Die Gitterstruktur kann mindestens bereichsweise periodisch sein mit einer Perio-  
20 denlänge, die in der Größenordnung der Strahlungswellenlänge liegt, vorzugsweise jedoch geringer ist als die Strahlungswellenlänge ist (Sub- $\lambda$ -Strukturen). Dadurch kann ein Doppelbrechungseffekt ähnlich der von transparenten optischen Komponenten bekannten strukturinduzierten  
25 Doppelbrechung (Formdoppelbrechung) erzeugt werden. Die Anordnung der diffraktiven Strukturelemente, d.h. insbesondere deren Ausrichtung, deren Periodizitätsabstand und/oder die Strukturtiefe können zur Bildung von Verzögerungsbereichen unterschiedlicher Verzögerungswirkung lokal variieren.

30 Die hierbei genutzte Formdoppelbrechung ist eine Eigenschaft, die im wesentlichen auf eine inhomogene Materialverteilung in den diffraktiven



Strukturen zurückgeht und besonders stark dann hervortritt, wenn der Abstand der Strukturelemente kleiner ist als die Wellenlänge der einfallenden Strahlung. Bei ausreichend kleinen Gitterstrukturen ist beispielsweise nur noch die nullte Beugungsordnung ausbreitungsfähig  
5 (Zero-Order-Gitter). Der Abstand von Strukturelementen beträgt daher vorzugsweise weniger als 90% oder 80% oder 70% der Arbeitswellenlänge.

Reflektive Verzögerungsanordnungen gemäß der Erfindung können in  
10 vielen optischen Systemen nutzbringend verwendet werden. Bevorzugt ist die Anwendung in einem Beleuchtungssystem und/oder in einem Projektionsobjektiv einer Mikrolithografie-Projektionsbelichtungsanlage.

Die vorstehenden und weitere Merkmale gehen außer aus den  
15 Ansprüchen auch aus der Beschreibung und aus den Zeichnungen hervor, wobei die einzelnen Merkmale jeweils für sich alleine oder zu mehreren in Form von Unterkombinationen bei einer Ausführungsform der Erfindung und auf anderen Gebieten verwirklicht sein und vorteilhafte sowie für sich schutzfähige Ausführungsformen darstellen können.

20

#### KURZBESCHREIBUNG DER ZEICHNUNGSFIGUREN

Fig. 1 ist eine schematische Darstellung einer als Wafer-Stepper  
ausgebildeten Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage,  
25 die ein katadioptrisches Projektionsobjektiv mit geometrischer Strahlteilung gemäß einer Ausführungsform der Erfindung umfasst;

Fig. 2 ist eine schematische Detailansicht des katadioptrischen  
30 Objektivteils des in Fig. 1 gezeigten Projektionsobjektivs;

- Fig. 3 ist eine schematische Detailansicht einer Ausführungsform einer reflektiven Verzögerungsanordnung;
- Fig. 4 ist ein Diagramm zur Erläuterung der Funktionsweise der Verzögerungsanordnung von Fig. 3;
- Fig. 5 ist eine schematische Detailansicht einer anderen Ausführungsform einer reflektiven Verzögerungsanordnung;
- Fig. 6 ist eine schematische Darstellung eines ein katadioptrischen Projektionsobjektivs mit physikalischer Strahlteilung (Polarisationsstrahlteilung) gemäß einer Ausführungsform der Erfindung umfasst;
- Fig. 7 ist ein schematischer Ausschnitt aus einem als Verzögerungsanordnung wirkenden Umlenkspiegel des Projektionsobjektives in Fig. 7;
- Fig. 8 ist eine schematische Draufsicht auf die Verzögerungsanordnung gemäß Fig. 7;
- Fig. 9 ist eine schematische Darstellung einer Ausführungsform eines Vorderflächenspiegels mit anisotroper Reflexionsbeschichtung;
- Fig. 10 ist eine schematische Darstellung einer anderen Ausführungsform eines Vorderflächenspiegels mit anisotroper Reflexionsbeschichtung;
- Fig. 11 ist eine schematische Darstellung einer Ausführungsform eines Beleuchtungssystems einer DUV-Mikrolithografie-Projektionsbelichtungsanlage mit einer Ausführungsform einer reflektiven Verzögerungsanordnung;

Fig. 12 ist eine schematische Darstellung einer Ausführungsform eines EUV-Projektionsobjektivs mit einer reflektiven Verzögerungsanordnung; und

5

Fig. 13 ist eine schematische Darstellung einer für extreme Ultraviolettstrahlung (EUV) ausgelegten reflektiven Verzögerungsanordnung.

10

#### DETAILLIERTE BESCHREIBUNG BEVORZUGTER AUSFÜHRUNGSFORMEN

In Fig. 1 ist schematisch eine Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage in Form eines Wafer-Steppers 1 gezeigt, der zur Herstellung von  
15 hochintegrierten Halbleiterbauelementen vorgesehen ist. Die Projektionsbelichtungsanlage umfasst als Lichtquelle einen Excimer-Laser 2, der Ultraviolettlicht mit einer Arbeitswellenlänge  $\lambda$  von 157 nm ausstrahlt, die bei anderen Ausführungsformen auch darüber, beispielsweise bei 193 nm oder 248 nm, oder darunter liegen kann. Ein nachgeschaltetes Beleuchtungssystem 4 erzeugt ein großes, scharf begrenztes und homogen beleuchtetes Bildfeld, das an die Telezentrie-Erfordernisse des nachgeschalteten Projektionsobjektivs 5 angepasst ist. Das Beleuchtungssystem hat Einrichtungen zur Auswahl des Beleuchtungsmodus und ist beispielsweise zwischen konventioneller  
25 Beleuchtung mit variablen Kohärenzgrad, Ringfeldbeleuchtung und Dipol- oder Quadrupolbeleuchtung umschaltbar.

Hinter dem Beleuchtungssystem ist eine Einrichtung 6 zum Halten und Manipulieren einer Maske 7 so angeordnet, dass die Maske in der  
30 Objektebene 8 des Projektionsobjektivs liegt und in dieser Ebene zum Scannerbetrieb in einer Abfahrrichtung 9 (y-Richtung) mittels eines Scanantriebs bewegbar ist.

Hinter der Maskenebene 8 folgt das Projektionsobjektiv 5, das als Reduktionsobjektiv wirkt und ein Bild eines an der Maske angeordneten Musters in reduziertem Maßstab, beispielsweise im Maßstab 1:4 oder 1:5, auf einen mit einer Photoresistschicht bzw. Photolackschicht belegten Wafer 10 abbildet, der in der Bildebene 11 des Reduktionsobjektivs angeordnet ist. Andere Reduktionsmaßstäbe, beispielsweise stärkere Verkleinerungen bis 1:20 oder 1:200 sind möglich.

10 Der Wafer 10 wird durch eine Einrichtung 12 gehalten, die einen Scannerantrieb umfasst, um den Wafer synchron mit dem Retikel 7 parallel zu diesem zu bewegen. Alle Systeme werden von einer Steuereinheit 13 gesteuert.

15 Das Projektionsobjektiv 5 arbeitet mit geometrischer Strahlteilung und hat zwischen seiner Objektebene (Maskenebene 8) und seiner Bildebene (Waferebene 11) einen katadioptrischen Objektivteil 15 mit einem ersten Umlenkspiegel 16 und einem Konkavspiegel 17, wobei der ebene Umlenkspiegel 16 derart gegenüber der optischen Achse 18 des Projektionsobjektivs gekippt ist, dass die von der Objektebene kommende Strahlung durch den Umlenkspiegel 16 in Richtung Konkavspiegel 17 umgelenkt wird. Zusätzlich zu diesem für die Funktion des Projektionsobjektivs notwendigen Spiegel 16 ist ein zweiter, ebener Umlenkspiegel 19 vorgesehen, der derart gegenüber der optischen Achse gekippt ist, dass die vom Konkavspiegel 17 reflektierte Strahlung durch den Umlenkspiegel 19 in Richtung Bildebene 11 zu den Linsen des nachfolgenden, dioptrischen Objektivteils 20 umgelenkt wird. Die senkrecht aufeinander stehenden, ebenen Spiegelflächen 16, 19 sind an einer als Spiegelprisma ausgebildeten Strahlumlenkeinrichtung 21 (Fig. 2) vorgesehen und haben parallele Kippachsen senkrecht zur optischen Achse 18. Es ist möglich, die Spiegel 16, 19 als körperlich von einander getrennte Spiegel auszubilden.

Der sphärisch gekrümmte Konkavspiegel 17 ist am Ende eines schräg gestellten Seitenarmes 25 angeordnet. Durch die Schrägstellung des Seitenarms kann unter anderem auf der Maskenseite ein ausreichender  
5 Arbeitsabstand über die gesamte Breite des Objektivs sichergestellt werden. Entsprechend können die Anstellwinkel der mit ihren Ebenen senkrecht aufeinander stehenden Umlenkspiegel 16, 19 gegenüber der optischen Achse 18 um mehrere Grad von  $45^\circ$  abweichen.

- 10 Im gezeigten Beispiel ist der katadioptrische Objektivteil so ausgelegt, dass im Bereich des zweiten Umlenkspiegels 19 ein Zwischenbild entsteht, welches bevorzugt nicht mit der Spiegelebene zusammenfällt, sondern entweder dahinter oder in Richtung Konkavspiegel 17 davor liegen kann. Dadurch hat das Projektionsobjektiv 5 zwei Pupillenebenen,  
15 wobei eine Pupillenebene 35 in unmittelbarer Nähe des Konkavspiegels 17 und eine Pupillenebene 40 im refraktiven Objektivteil 20 liegt.

- Eine Besonderheit der Objektivkonstruktion besteht darin, dass in einem vom Licht doppelt durchlaufenen Bereich zwischen der Strahlumlenk-  
20 einrichtung 21 und dem Konkavspiegel 17 in dem schräg gestellten Seitenarm 25 des Objektivs unmittelbar vor dem Konkavspiegel 17 ein doppelbrechendes Transmissionselement 30 angeordnet ist, das in Verbindung mit dem Konkavspiegel 17 eine reflektive Verzögerungsanordnung 50 bildet, die eine über ihren Nutzquerschnitt örtlich varii-  
25 rende Verzögerungswirkung hat. Die Verzögerungsanordnung 50 dient einerseits als Polarisationsdreheinrichtung, die im Lichtweg zwischen dem ersten und dem zweiten Umlenkspiegel 16 bzw. 19 eine globale Drehung der Polarisationsvorzugsrichtung des Lichtes um ca.  $90^\circ$  bewirkt. Ausserdem wirkt sie als Kompensationsanordnung, die mittels  
30 der örtlich variierenden Verzögerungswirkung eine ortsabhängige Einstellung des Polarisationszustandes über den Querschnitt des Strahlungsbündels bewirkt. Der Zweck wird im folgenden näher erläutert.

Die Spiegelflächen der Umlenkspiegel 16, 19 sind zur Erzielung hoher Reflexionsgrade mit hochreflektierenden Schichten 23, 24 belegt (Fig. 2). Diese umfassen eine oder mehrere Schichten aus dielektrischem Material, deren Brechungsindizes und Schichtdicken so gewählt sind, dass eine Reflexionsverstärkung im genutzten Inzidenzwinkelbereich auftritt.

Diese Schichten führen einen inzidenzwinkelabhängigen und polarisationsabhängigen Phasenunterschied zwischen den senkrecht zueinander ausgerichteten Feldkomponenten des elektrischen Feldvektors des reflektierten Lichtes (s-Polarisation bzw. p-Polarisation) ein. Dieser ergibt sich daraus, dass die Schichten für s- und p-Polarisation in Abhängigkeit vom Einfallswinkel der Strahlen je nach Einfallswinkel einen unterschiedlichen optischen Weg darstellen. Außerdem haben übliche Mehrschichten inzidenzwinkelabhängig unterschiedliche Reflexionsgrade für s- und p-Polarisation. Häufig ist bei üblichen Reflexionsschichten der Reflexionsgrad für s-Polarisation über den gesamten Winkelbereich größer als für p-Polarisation, wobei sich im Bereich des bei ca.  $45^\circ$  liegenden Brewster-Winkels besonders starke Reflektivitätsunterschiede ergeben können.

Diese Amplituden- und Phaseneffekte können einerseits dazu führen, dass die p-Komponente des elektrischen Feldes beim Durchtritt durch das Objektiv stärker geschwächt wird als die s-Komponente, so dass beispielsweise bei eintrittsseitigem, unpolarisiertem oder zirkularpolarisiertem Licht das in der Bildebene auftreffende Licht eine stärkere s-Komponente aufweist. Andererseits können über den Strahlquerschnitt variierende Polarisationszustände auftreten. Dadurch können z.B. strukturelle richtungsabhängige Auflösungsdifferenzen entstehen.

Diese Probleme werden bei der gezeigten Ausführungsform vermieden, indem die Polarisierung des Lichts mit Hilfe der reflektiven Verzögerungsanordnung 50 zwischen den Umlenkspiegeln 16, 19 global um insgesamt ca.  $90^\circ$  gedreht wird und zusätzlich eine ortsabhängige Korrektur von Polarisationszuständen im Bereich der Pupillenebene 35 eingeführt wird.

Zur Erläuterung zeigt Fig. 2 ein Beispiel, bei dem das auf den ersten Umlenkspiegel 16 treffende Eingangslicht 27 zirkular polarisiert ist, wobei die durch die Pfeillängen symbolisierten Amplituden von s- und p-Polarisation im wesentlichen gleich sind. Nach Reflexion am schräggestellten Spiegel 16 ist die parallel zur Einfallsebene schwingende Komponente des elektrischen Feldes stärker geschwächt als die s-Komponente. Dieses Licht durchtritt das als modifizierte  $\lambda/4$ -Platte ausgebildete doppelbrechende Transmissionselement 30, welches die Phasen der Feldkomponenten bei einfachem Durchtritt über den gesamten Nutzquerschnitt um eine Viertel Wellenlänge gegeneinander verzögert und darüber hinaus ggf. ortsabhängig weitere kleine Phasenverzögerungen ( $< \lambda/4$ ) einführt. Nach Reflexion am Konkavspiegel 17, bei der der Polarisationszustand weitgehend unverändert bleibt, tritt das reflektierte Licht erneut durch das somit doppelt durchlaufene Transmissionselement 30, wobei eine weitere Phasenverzögerung um ca.  $\lambda/4$  zuzüglich eventueller kleiner ortsabhängiger positiver oder negativer Verzögerungsbeiträge stattfindet. Der doppelte Durchtritt durch die Platte 30 führt somit insgesamt zu einer  $\lambda/2$ -Verzögerung, welche einer Drehung der Polarisationsvorzugsrichtungen um  $90^\circ$  entspricht, und zu einer über den Querschnitt variierenden weiteren Verzögerung, die in der Regel dem Betrage nach klein gegenüber der Hauptverzögerung (z.B. weniger als 10 - 20% von  $\lambda/4$ ) ist und sich dieser überlagert. Die Variation kann durch unterschiedliche Neigungswirkung und/oder Neigungsrichtung der von den ablenkenden Strukturen erzeugten Durchtrittsrichtung eingestellt werden.

- Dadurch wird einerseits erreicht, dass das in Bezug auf den zweiten Umlenkspiegel 19 s-polarisierte Licht die (schwächere) Amplitude des hinter dem ersten Umlenkspiegel p-polarisierten Anteils hat, während die p-Komponente nun die größere Amplitude hat. Diese p-Komponente wird nun aufgrund der oben erläuterten Reflektivitätsunterschiede stärker geschwächt als die (schwächere) s-Komponente, so dass sich eine Angleichung der Amplituden für s- und p-Polarisation ergibt. Günstigerweise sind die Mehrfachschichten 23 und 24 so ausgelegt, dass hinter dem zweiten Umlenkspiegel 16 im wesentlichen gleiche Amplituden von s- und p-Polarisation vorliegen. Mit diesem Licht ist eine Abbildung ohne strukturellrichtungsabhängige Kontrastunterschiede möglich.
- 15 Zusätzlich wird eine ortsabhängige Polarisationskorrektur im Bereich der Pupillenebene 35 eingeführt, durch die eventuell feldnah auftretende, inzidenzwinkelabhängige Polarisationsvariationen kompensiert werden können.
- 20 In Fig. 3 ist die Verzögerungsanordnung 50 schematisch im Detail gezeigt. Sie besteht im wesentlichen aus dem doppelbrechendem Transmissionselement 30 und dem unmittelbar dahinter angeordneten Konkavspiegel 17, dessen Spiegelfläche 51 mit der Mehrlagen-Reflexionsbeschichtung 52 mit geringem Abstand hinter der der Eintrittsseite 53 der Verzögerungsanordnung gegenüberliegenden Austrittsseite 54 der
- 25 Platte 30 liegt. Die transparente, doppelbrechende planparallele Platte 30 besteht aus einem einzigen anisotropen, optisch einachsigen Kristall, dessen kristallographische Hauptachse 55 im wesentlichen senkrecht zu den planparallelen Plattenoberflächen 53, 54 und parallel zur
- 30 optischen Achse 56 der Verzögerungsanordnung 50 steht. Das Material der Platte ist für Licht der vorgesehenen Arbeitswellenlänge transparent, wobei bevorzugte Arbeitswellenlängen im UV-B reich mit Wellenlängen



unterhalb ca. 260 nm liegen. Die einstückige Platte 30 kann z.B. für Licht mit 157 nm Wellenlänge aus Magnesiumfluorid und für Licht mit 193 nm Wellenlänge aus Magnesiumfluorid oder Quarz (Siliziumdioxid) oder aus mechanisch verspanntem Kalziumfluorid oder Quarz bestehen. Die

5 Platte 30 wird in den Strahlengang der zu beeinflussenden Strahlung so eingebaut, daß die kristallografische Hauptachse 55 parallel, bzw. die Plattenflächen 53, 54 senkrecht zur optischen Achse 18 des Projektionsobjektives stehen. Bei verspannten Platten wird die Funktion der kristallografischen Hauptachse durch die durch die Verspannung

10 induzierte Hauptachse ersetzt. Die axiale Dicke D der Platte liegt typischerweise in der Größenordnung mehrerer Zehntel Millimeter und kann gegebenenfalls so groß sein, dass die Platte selbsttragend eingebaut werden kann (beispielsweise ca. 0,5 mm - 10 mm). Es ist auch möglich, zur Unterstützung der Platte einen Träger aus isotropem transparentem

15 Material (beispielsweise Quarzglas oder Calciumfluorid) vorzusehen, an dem die Platte anliegt.

Auf der Eintrittsseite 53 und der Austrittsseite 54 der Platte sind einander zugeordnete, ablenkende Strukturen 60, 61 mit aufeinander abgestimm-

20 ten Ablenkeigenschaften ausgebildet. Im Beispielsfall liegen die ablenkenden Strukturen in Form von Sechseckbereichen gleicher Größe vor, die die gesamte Eintrittsseite 53 bzw. Austrittsseite 54 flächenfüllend bedecken. In jedem Sechseckbereich ist eine nach Art eines geblazeten Gitters wirkende ablenkende Struktur vorgesehen, wobei sich die

25 Ausrichtungen der parallelen Gitterstrukturen zwischen benachbarten Verzögerungsbereichen 65, 66 in der Regel um einige Winkelgrade unterscheiden. Die ablenkenden Strukturen definieren direkt aneinander angrenzende Verzögerungsbereiche mit unterschiedlicher Verzögerungswirkung. Die Bereichsgrenzen zwischen den Verzögerungsbereichen sind

30 durch gestrichelte Linien angedeutet.

Anhand der einander zugeordneten, seitlich leicht gegeneinander versetzten diffraktiven Strukturen 60 (auf der Eintrittsseite 53) und 61 (auf der Austrittsseite 54) wird nun die Wirkungsweise des Transmissions-  
elementes 30 näher erläutert. Das parallel zur optischen Achse des  
5 Systems einfallende Licht (Eingangsstrahlungsbündel 70) trifft an der Eingangsseite 53 auf die ablenkende Struktur 60. Dieses Transmissionsgitter lenkt die Strahlung durch Beugung so ab, daß die Durchtrittsrichtung 71 der ersten Beugungsordnung innerhalb der Kristallplatte 30 schief zur kristallografischen Hauptachse 55 verläuft. Als „schief“ wird hier  
10 jede Durchtrittsrichtung bezeichnet, die weder parallel, noch senkrecht zur kristallografischen Hauptachse 55 steht. Solche Durchtrittsrichtungen sind durch einen Neigungswinkel NW von mehr als  $0^\circ$  und weniger als  $90^\circ$  gekennzeichnet. Die diffraktive Struktur 61 an der Ausgangsseite 54 macht aufgrund der gleichen Gitterkonstante wie die Eingangsstruktur 60  
15 diese Ablenkung wieder rückgängig, so daß das austretende Licht 67 parallel versetzt zum entsprechenden einfallenden Licht parallel zur optischen Achse des Systems austritt. Diese Verhältnisse sind in Fig. 3 übertrieben gezeichnet. Die Richtung der kristallografischen Hauptachse 55 und die Durchtrittsrichtung 71 spannen eine die Neigungsrichtung  
20 definierende Durchtrittsebene auf, deren Schnittlinie 72 mit der Eintrittsseite 53 der Platte senkrecht zu den Linien der ablenkenden Gitterstruktur 60 verläuft. Die vom Licht innerhalb des Kristalls in Durchtrittsrichtung 71 zurückgelegte Weglänge W ist gemäß  $W = D/\cos(NW)$  von der Plattendicke D und dem Neigungswinkel NW abhängig.

25

Aufgrund der doppelbrechenden Eigenschaften des Plattenmaterials breitet sich innerhalb der Platte 30 eine Lichtwelle mit zwei orthogonalen Schwingungsrichtungen aus, d.h. in Form von senkrecht zueinander polarisierten Feldkomponenten, wobei die Schwingungsrichtung 75 der  
30 einen Komponente in der Durchtrittsebene und die Schwingungsrichtung 76 der anderen Komponente senkrecht zur Durchtrittsebene verläuft. Für die Zwecke dieser Anmeldung wird die in der Durchtrittsebene

schwingende Komponente 75 als ordentlicher Strahl (Index o) und die senkrecht dazu schwingende Komponente 76 als außerordentlicher Strahl (Index ao) bezeichnet. Für diese beiden Komponenten gelten bei doppelbrechenden Materialien im allgemeinen in Abhängigkeit von der

5 Durchtrittsrichtung unterschiedliche Brechzahlen  $n_o$  für den ordentlichen und  $n_{ao}$  für den außerordentlichen Strahl. Deren Verhältnis ist in Fig. 4 schematisch für den Fall eines negativ doppelbrechenden Kristalls gezeigt. Wie allgemein bekannt, ist die Brechzahl  $n_o$  in allen Richtungen gleich, während sich die Brechzahl  $n_{ao}$  in Abhängigkeit vom Winkel NW

10 zur kristallografischen Hauptachse 55 ändert. In Richtung der kristallografischen Hauptachse 55 verschwindet diese Aufspaltung ( $n_{ao} = n_o$ ), während senkrecht dazu die Betragsdifferenz  $\Delta n = |n_{ao} - n_o|$  maximal wird ( $\Delta n_{max}$ ). Wie aus der Theorie der Verzögerungsplatten bekannt, verlassen die beiden senkrecht zueinander polarisierten Feldkomponenten das

15 doppelbrechende Material ohne Richtungsdivergenz, aber mit einem Gangunterschied G, gemäß  $G = W \cdot x |n_{ao} - n_o|$ .

Nach dem ersten Durchtritt durch die Platte 30 trifft das austretende Licht 67 auf die Spiegelfläche 51 des Konkavspiegels 17 und wird von

20 dieser im wesentlichen in Gegenrichtung in Richtung Platte 30 rückreflektiert. Die ablenkenden Strukturen 61 an deren Austrittsseite 54 lenken die Strahlung so um, dass sie erneut im wesentlichen parallel zur Durchtrittsrichtung 71 und damit schief zur kristallografischen Hauptachse 55 durch die Platte tritt (Reziprozitätsgesetz). Beim Austritt

25 aus der Eintrittsseite 53 der Platte sorgen die dortigen ablenkenden Strukturen 60 dafür, dass das austretende Licht (Ausgangsstrahlbündel 80) im wesentlichen parallel zum eintretenden Licht 70 in Richtung der Strahlumlenkeinrichtung 21 zurückläuft. Beim zweiten Durchtritt durch die doppelbrechende Transmissionsplatte 30 wird erneut ein Gangunter-

30 schied G der orthogonalen Feldkomponenten erzeugt, so dass die erzeugte Gesamtverzögerung im wesentlichen dem Doppelten des Gangunterschiedes G entspricht.

Eine solche Anordnung erzeugt die gewünschte Verteilung lokal unterschiedlicher Polarisationszustände ausschließlich durch Verzögerungswirkung auf die Eingangsstrahlung, nicht durch Filterung. Dadurch wird ein hoher Transmissionswirkungsgrad erreicht.

5

Eine Besonderheit der Verzögerungsanordnung besteht darin, daß durch die Dimensionierung bzw. Auslegung der ablenkenden Strukturen der Neigungswinkel NW in gewissen Grenzen einstellbar ist, wobei der Neigungswinkel bei der gezeigten Lineargitterstruktur zunimmt, je

10 geringer die Gitterkonstante (Abstand benachbarter Gitterlinien senkrecht zum Linienverlauf) ist. Anhand von Fig. 4 ist erkennbar, daß im Bereich kleiner Neigungswinkel, wenn also die Durchtrittsrichtung 71 in sehr spitzem Winkel zur kristallografischen Hauptachse 55 steht, die Brechzahldifferenz  $\Delta n$  sehr kleine Werte annehmen kann, die nur einen

15 Bruchteil der maximalen Brechzahldifferenz  $\Delta n_{\max}$  betragen, welche bei einem rechten Winkel zwischen Lichtausbreitungsrichtung 71 und kristallografischer Hauptachse 55 auftreten würde. Die durch die Erfindung geschaffene Möglichkeit der Einstellung sehr kleiner Brechzahldifferenzen (bei gegebenem Plattenmaterial) führt dazu, daß die für einen gewünsch-

20 ten Gangunterschied G der Polarisationskomponenten am Ausgang der Platte 30 erforderliche Plattendicke D bei erfindungsgemäßen Verzögerungsanordnungen um ein Vielfaches höher sein kann als bei herkömmlichen Verzögerungsplatten, bei denen die Einfallsrichtung des Lichtes senkrecht auf der kristallografischen Hauptachse 55 steht. Durch die

25 Erfindung können also unbequem geringe Dicken von doppelbrechenden Platten vermieden werden, was sich besonders beim Einsatz großer Querschnitte vorteilhaft auswirkt. Auch die Neigungsrichtung ist mittels der ablenkenden Strukturen gezielt einstellbar.

30 Bei der in Fig. 3 gezeigten Ausführungsform sind die Plattendicke D und der Neigungswinkel NW (durch geeignete Gitterkonstanten der ablenkenden Gitter) so gewählt, daß sich entlang des Weges W zwischen den

Feldkomponenten 75, 76 des durchtretenden Lichtes beim ersten Durchtritt ein Gangunterschied  $G$  von ca. einem Viertel der Wellenlänge des eintretenden Lichtes 70 ergibt. Dadurch wird, in Analogie zu einer Viertelwellenplatte, eintretendes zirkular polarisiertes Licht in austretendes linear polarisiertes Licht umgewandelt. Das zirkular polarisierte Licht wird vom Konkävspegel 17 rückreflektiert und erfährt auf dem Rückweg, d.h. beim zweiten Durchtritt durch die Platte 30, erneut eine  $\lambda/4$ -Verzögerung, so dass es in jedem der Verzögerungsbereiche 65, 66 die Verzögerungsanordnung im wesentlichen zirkular polarisiert verlässt.

10

Die Orientierung der Polarisationsvorzugsrichtung jedes Bereiches nach spiegelseitigem Austritt aus der Verzögerungsanordnung ist für jeden Bereich durch die Orientierung der ablenkenden Strukturen beeinflussbar. Deren Orientierung legt für jeden Bereich, also lokal, die Orientierung der Durchtrittsebene fest, und damit auch die Orientierung der Schwingungsrichtungen 75, 76 der senkrecht zueinander polarisierten Feldkomponenten. Diese Richtungen 75, 76 werden auch als induzierte Kristallachsen bezeichnet.

20 Die reflektive Verzögerungsanordnung 50 bewirkt somit über ihren gesamten Nutzquerschnitt in erster Näherung in einer  $\lambda/2$ -Phasenverzögerung zwischen dem Licht des Eingangsstrahlungsbündels 70 und dem Licht des Ausgangsstrahlbündels 80. Durch die über den Querschnitt verteilten Verzögerungsbereiche 65, 66 kann jedoch zusätzlich eine örtliche Variation der Verzögerungswirkung über den Nutzquerschnitt eingestellt werden. Hierzu können die ablenkenden Strukturen in den einzelnen Sechseck-Zellen 65, 66 so eingestellt, dass sich lokal kleine Abweichungen von der beschriebenen  $\lambda/2$ -Gesamtverzögerung ergeben können. Da diese ortsauflösende Beeinflussung der Polarisationszustände in der Nähe einer Pupillenebene 35 des Projektionsobjektivs erfolgt, können Polarisationsinhomogenitäten, die sich im Bereich einer

Feldebene des Projektionsobjektivs strahlwinkelabhängig einstellen, kompensiert werden (vgl. Erläuterungen zu Fig. 6).

- Es gibt auch Ausführungsformen, die ausschliesslich als Kompensationsmittel dienen. Bei diesen kann die über den Nutzquerschnitt variierende Verzögerungswirkung dem Betrage nach überwiegend oder durchgehend klein gegen  $\lambda/4$  sein. Das ist z.B. durch entsprechend geringere Plattendicken des Transmissionselementes und/oder durch Einstellung geringerer Neigungswinkel möglich.
- Verzögerungsanordnungen der beschriebenen Art sind kostengünstig mit hoher Güte herstellbar. Ausgangskristalle aus Siliziumdioxid oder Magnesiumfluorid zur Herstellung der doppelbrechenden Platte sind gerade in der benötigten Orientierung der kristallografische Hauptachse auch in großen Abmessungen bis beispielsweise 20 oder 30 cm Durchmesser insbesondere für Siliziumdioxid verfügbar. Zur Herstellung einer Verzögerungsanordnung ist nur eine Platte zu bearbeiten, die aufgrund der typischen Dicke von einigen zehntel Millimetern relativ unempfindlich und bei der Bearbeitung gut handhabbar ist. Die Herstellung der ablenkenden, d.h. diffraktiven und/oder refraktiven Strukturen auf den Plattenoberflächen kann mit Hilfe geeigneter lithographischer Prozesse erfolgen, so daß bei großen Stückzahlen die Bereitstellungskosten niedrig bleiben können. Auch eine mechanische Strukturierung ist prinzipiell möglich.
- In Fig. 5 ist eine andere Ausführungsform einer reflektiven Verzögerungsanordnung 150 schematisch gezeigt. Der Aufbau zeigt Ähnlichkeiten mit der Verzögerungsanordnung 50 in Fig. 3, weshalb für entsprechende Merkmale entsprechende Bezugszeichen, vergrößert um 100, gewählt werden. Die Verzögerungsanordnung umfasst eine einstückige planparallele Transmissionsplatte 130 aus doppelbrechendem Material, dessen kristallografische Hauptachse 155 senkrecht auf den Plattenebenen bzw. parallel zur optisch n Achse 156 der Verzögerungs-

anordnung steht. Auf der Eintrittsseite 153 sind sechseckige Zellen mit ablenkenden Strukturen der oben beschriebenen Art ausgebildet. Unmittelbar auf die der Eintrittsseite 153 gegenüber liegende Plattenoberfläche 154 ist eine Mehrlagen-Reflexbeschichtung 152 aufgebracht.

- 5 Ähnlich wie bei der Ausführungsform gemäß Fig. 3 sind an der der Spiegelfläche 151 zugewandten Seite 154 der Platte 130 ablenkende Strukturen 161 vorgesehen.

- Das im wesentlichen parallel zur optischen Achse der Verzögerungs-  
10 anordnung einfallende Eingangsstrahlbündel 170 wird an den eintritts-  
seitigen ablenkenden Strukturen 160 des Verzögerungsbereiches 166 in  
eine schief zur Achse 155 verlaufende Durchtrittsrichtung abgelenkt,  
wodurch sich gemäß der obigen Erläuterung eine Phasenverzögerung im  
ersten Durchtritt bis zur Spiegelfläche 154 in Abhängigkeit von Platten-  
15 dicke D und Neigungswinkel NW ergibt. An der Spiegelfläche 154 wird die  
Strahlung reflektiert, wobei die ablenkenden Strukturen 161 für eine  
Rückreflexion der Strahlung in sich selbst sorgen. Die rückreflektierte  
Strahlung durchläuft im wesentlichen mit gleichem Neigungswinkel zur  
kristallografischen Achse 155 die Platte 130 in einem zweiten Durchtritt,  
20 bis sie auf die an der Eintrittsseite vorgesehenen ablenkenden Strukturen  
160 trifft, die sie in ein Ausgangsstrahlbündel 180 mit einer im  
wesentlichen parallel zur Einfallsrichtung verlaufende Ausfallsrichtung  
umlenken.

- 25 Die reflektive Verzögerungsanordnung 150 mit einer gegebenenfalls  
ortsauflösend variierenden Verzögerungswirkung kann eine gekrümmte  
Form haben, um beispielsweise innerhalb eines katadioptrischen Projek-  
tionsobjektivs als Konkavspiegel zu dienen, der gleichzeitig eine über  
seinen Querschnitt variierende Verzögerungswirkung auf die reflektierte  
30 Strahlung hat. Eine beispielhafte Verwendung wird anhand Fig. 6 näher  
erläutert.

Fig. 6 zeigt schematisch den Aufbau eines katadioptrischen Projektionsobjektives 200 mit Polarisationsstrahlteiler. Es dient dazu, ein in seiner Objekzebene 201 angeordnetes Muster eines Retikels oder dergleichen unter Erzeugung genau eines reellen Zwischenbildes (nicht gezeigt) in seine Bildebene 202 in reduziertem Maßstab abzubilden, beispielsweise im Verhältnis 4:1. Das für eine Arbeitswellenlänge von  $\lambda = 157 \text{ nm}$  ausgelegte Projektionsobjektiv hat zwischen der Objekzebene und der Bildebene einen ersten, katadioptrischen Objektivteil 203 und dahinter einen zweiten, rein dioptrischen Objektivteil 204. Der katadioptrische Objektivteil umfasst einen physikalischen Strahlteiler 205 mit einer schräg zur optischen Achse ausgerichteten, ebenen Polarisationsstrahlteilerfläche 207 sowie eine Spiegelgruppe mit einem abbildenden Konkavspiegel bzw. Hohlspiegel 250, der gleichzeitig als raumvarianter reflektiver Retarder (d.h. als Verzögerungsanordnung mit örtlich variierender Verzögerungswirkung) dient. Der verkleinernd wirkende zweite Objektivteil 204 hat einen zur optischen Achse geneigten ebenen Umlenkspiegel 210, der es in Verbindung mit der Reflexion an der Strahlteilerfläche 207 ermöglicht, die in der Objekzebene angeordnete Maske parallel zu einem in der Bildebene 202 angeordneten lichtempfindlichen Substrat, beispielsweise einem mit einer Fotoresistschicht beschichteten Halbleiterwafer, auszurichten. Dadurch wird ein Scannerbetrieb von Maske und Wafer erleichtert. Es sind auch Ausführungsformen ohne Umlenkspiegel oder Varianten mit mehr als einem Umlenkspiegel möglich.

25

Charakteristisch für Projektionsobjektive dieses Typs ist der Betrieb mit polarisiertem Ultraviolettlicht (linear oder zirkular polarisiert in den jeweiligen Objektivbereichen), wobei der Polarisationszustand an die Eigenschaften der Strahlteilerschicht 207 angepasst ist. Die polarisationsselektive Strahlteilerschicht soll im wesentlichen eine Polarisationsrichtung durchlassen und die andere blockieren. Die Rollen der Polarisationskomponenten (Komponenten des elektrischen Feldvektors

30



senkrecht bzw. parallel zur jeweiligen Einfallsebene auf eine optische Komponente) vertauschen sich dabei je nachdem, ob die Strahlteilerschicht 207 in Transmission oder in Reflexion genutzt wird.

- 5 Alle Eintrittsflächen und Austrittsflächen der Linsen und des Polarisationsstrahlteilers sind mit mehrlagigen, dielektrischen Antireflex-Interferenzschichtsystemen (AR-Schichten) belegt, um die Transmission des Objektivs zu verbessern. Die Spiegelflächen der Spiegel 250, 210 sind mit hochreflektierenden dielektrischen Reflex-Interferenzschichtsystemen (HR-Schichten) 252, 212 belegt.
- 10

- Eine Besonderheit dieses Systems ist die Konkavspiegelanordnung 250. Sie umfasst ein sphärisch gekrümmtes Spiegelsubstrat 260 mit einer an der Konkavseite angebrachten Mehrlagen-Reflexbeschichtung 252 sowie
- 15 ein direkt auf der Reflexbeschichtung 252 aufgebrachtes, sphärisch gekrümmtes doppelbrechendes Transmissionselement 230. Das Transmissionselement 230 hat über seinen gesamten Nutzquerschnitt annähernd die Verzögerungswirkung einer  $\lambda/4$ -Platte, wobei dieser globalen Verzögerungswirkung eine ortsauflösend variierende weitere Verzögerungswirkung überlagert ist, die in den verschiedenen Verzögerungsbereichen 270, 271, 272 jeweils klein gegen  $\lambda/4$  ist. Hierzu ist die
- 20 Konkavspiegelanordnung 250 analog zur Verzögerungsanordnung 150 in Fig. 5 ausgebildet. Sie hat also an der dem Strahlteiler zugewandten Eintrittsfläche für jeden der Verzögerungsbereiche 270, 271, 272
- 25 ablenkende Strukturen, die die einfallende Strahlung jeweils lokal in eine schiefe Richtung zur kristallografischen Hauptachse 255 der Transmissionsplatte 230 ablenkt. Außerdem sind am spiegelseitigen Austritt des Transmissionselementes 230 ablenkende Strukturen ausgebildet, die eine Rückreflexion der reflektierenden Strahlen in sich selbst
- 30 bewirken.

- Das Projektionsobjektiv 200 ist zu einem Betrieb mit zirkular polarisiertem Eingangslicht ausgelegt, das von einem oberhalb der Objektebene 201 angeordneten Beleuchtungssystem bereitgestellt wird. Nach Durchtritt durch die in der Objektebene angeordnete Maske und eine dahinter angeordnete  $\lambda/4$ -Platte 220 ist das Licht in Bezug auf die Strahlteilerschicht 207 s-polarisiert und wird von dieser in Richtung Konkavspiegelanordnung 250 reflektiert. Nach Durchtritt durch eine oder mehrere schematisch angedeutete Linsen 225 trifft das Eingangsstrahlungsbandel 280 auf das doppelbrechende Transmissionselement 230. Beim ersten Durchtritt durch das Transmissionselement tritt über den gesamten Nutzquerschnitt im wesentlichen eine Phasenverzögerung von  $\lambda/4$  zwischen den Feldkomponenten ein, so dass die Strahlung weitgehend zirkular polarisiert auf die Reflexbeschichtung 252 trifft, von der sie in Richtung Strahlumlenkeinrichtung zurückreflektiert wird. Im zweiten Durchtritt durch das Transmissionselement 230 wird eine weitere  $\lambda/4$ -Verzögerung eingeführt, so dass das von der Konkavspiegelanordnung 250 zum Strahlteiler 205 verlaufende Ausgangsstrahlungsbandel nach einem zweiten Durchtritt durch das Transmissionselement 230 in Bezug auf die Strahlteilerschicht 207 p-polarisiert ist. Das p-polarisierte Licht wird nun von der Strahlteilerschicht 207 transmittiert und trifft auf den Umlenkspiegel 210, von dem es in Richtung Bildebene 202 umgelenkt wird. Besonderheiten dieses Spiegels 210 werden unten im Zusammenhang mit Fig. 7 näher erläutert.
- Idealerweise ist die beschriebene Polarisationsdiskriminierung perfekt und das auf die einzelnen optischen Komponenten treffende oder diese durchtretende Licht hat den jeweils gewünschten Polarisationszustand. Durch polarisationsabhängige Wirkungen der Interferenzschichtsysteme mit Verlauf über die genutzten Einfallswinkel (Inzidenzwinkel), durch spannungsinduzierte und/oder intrinsische Doppelbrechung der transparenten optischen Komponenten und/oder durch Geometrieeffekte

kann jedoch eine unerwünschte Variation des Polarisationszustandes über den Querschnitt des Strahlungsbündels auftreten.

Dies kann bei herkömmlichen Systemen beispielsweise dazu führen,  
5 dass das vom Konkavspiegel Richtung Strahlteiler rückreflektierte Licht nicht perfekt p-polarisiert ist, sondern in Teilbereichen des Strahlquerschnitts auch andere Polarisationskomponenten hat. Für diese ist die Strahlteilerschicht nicht perfekt transmittierend, so dass an der Strahlteilerschicht einerseits Rückreflexion von Lichtanteilen Richtung  
10 Maske auftreten kann und andererseits die zum Umlenkspiegel transmittierte Strahlung über den Querschnitt ungleichmäßig polarisiert ist.

Diese Probleme werden bei der Ausführungsform dadurch vermieden,  
15 dass die Konkavspiegelanordnung 250 gleichzeitig als reflektive Verzögerungsanordnung mit einer über ihren Querschnitt variierenden Verzögerungswirkung ausgelegt ist. Dabei sind im Beispielsfall die Verzögerungswirkungen der einzelnen Verzögerungsbereiche 270, 271, 272 so an das Restsystem angepasst, dass die von der Spiegelanordnung 250 zum Strahlteiler gelangende Strahlung über den gesamten  
20 Querschnitt nahezu perfekt p-polarisiert ist, auch wenn die Eingangsstrahlung 280 für den Konkavspiegel über ihren Querschnitt eine Polarisationszustandsvariation aufweist. Dadurch kann der Strahlteiler 205 mit optimalem Transmissionswirkungsgrad genutzt werden.

25

Zur beispielhaften Verdeutlichung sind in Fig. 6 in den Teilfiguren 6-1, 6-2 und 6-4 die örtlichen Verteilungen des Polarisationszustandes über den Strahlquerschnitt an der entsprechenden Stellen des Strahlweges schematisch dargestellt. Teilfigur 6-3 zeigt schematisch die lokale  
30 Variation der Verzögerungswirkung der Verzögerungsanordnung 250 über den Nutzquerschnitt, um die „verzerrte“ Ortsverteilung der Polarisationsvorzugsrichtung in Teilfigur 6-2 (d.h. vor dem

- Konkavspiegel) in eine einheitliche Polarisierung nach dem Konkavspiegel (Teilfigur 6-4) zu überführen. Vor dem Eintritt in den Strahlteiler 205 ist die Strahlung über den gesamten Strahlbündelquerschnitt einheitlich linear polarisiert, und zwar mit s-Polarisation bezüglich der Einfallsebene
- 5 (Teilfigur 6-1). Aufgrund inzidenzwinkelabhängiger Polarisierungswirkung der Strahlteilerfläche ergibt sich nach Reflexion an dieser in dem auf den Konkavspiegel 250 gerichteten Eingangsstrahlbündel 280 eine ortsabhängige Variation der Vorzugsrichtung der Polarisierung (Teilfigur 6-2). Um diese Verzerrung zu kompensieren und zu einer über den
- 10 Querschnitt einheitlichen Polarisierung zurückzukehren, muss die Richtung der für die Verzögerungswirkung effektiven kristallografischen Achsen (Striche in Teilfigur 6-3) innerhalb der Verzögerungsbereiche 270, 271, 272 der Verzögerungsanordnung 250 lokal jeweils unter  $45^\circ$  zur lokal einfallenden Polarisierungsrichtung ausgerichtet sein. Dies wird
- 15 durch geeignete Auslegung der diffraktiven Strukturen der freiliegenden Eintrittsfläche und der der Reflexionsbeschichtung 252 zugewandten Austrittsfläche des Transmissionselementes 230 erreicht. Diese sind über den Querschnitt variierend so ausgelegt, dass das Ausgangsstrahlungsbündel 290 senkrecht zur Polarisierungsverteilung gemäß Teilfigur 6-2 polarisiert ist (Teilfigur 6-4). Dadurch kann eine über
- 20 den Strahlquerschnitt einheitliche, nahezu vollständige Transmission des Strahlungsbündels in Richtung Umlenkspiegel 210 ohne ortsabhängige Strahlungsverluste erzielt werden.
- 25 Obwohl der Umlenkspiegel 210 als „normaler“ Umlenkspiegel mit einer hochreflektierenden Reflexbeschichtung ausgelegt sein kann, ist bei der gezeigten Ausführungsform der Umlenkspiegel 210 ebenfalls als reflektive Verzögerungsanordnung mit einer über ihren Nutzquerschnitt räumlich variierenden Verzögerungswirkung ausgelegt, um aus dem in
- 30 Bezug auf die Spiegelfläche p-polarisierten Eingangsstrahlungsbündel 290 im Zuge der Umlenkung ein Ausgangsstrahlbündel 291 mit zylindersymmetrischem Polarisationszustandsverteilung (radial oder tangential)

weitgehend verlustfrei zu bilden. Aufbau und Funktion werden anhand von Fig. 7 näher erläutert.

Der als reflektive Verzögerungsanordnung mit ortsauflösend variierender Verzögerungswirkung ausgelegte Umlenkspiegel 210 umfasst ein doppelbrechendes Transmissionselement 230 in Form einer planparallelen Platte, an deren der Eingangsstrahlung gegenüber liegenden Rückseite 231 ein hochreflektierendes Mehrlagen-Reflexschichtsystem 212 angebracht ist. Das Ganze ist auf einem mechanisch und thermisch stabilen Spiegelsubstrat 211 aufgebracht. Das Transmissionselement 230 hat eine Vielzahl flächenfüllend angeordneter, sechseckiger Platten 232, 233 aus doppelbrechendem Material, deren kristallografische Hauptachsen 234, 235 senkrecht zur optischen Achse 236 der Verzögerungsanordnung bzw. parallel zu den ebenen Plattenflächen verlaufen.

Die Hauptachsen 234, 235 der Zellen bzw. Verzögerungsbereiche 232, 233 sind jeweils in Richtung der Winkelhalbierenden zwischen der Polarisationsrichtung P der eintretenden, insgesamt gleich linear polarisierten Strahlung und dem jeweiligen zur optischen Achse 236 gerichteten Radius durch die Mitte jeder Zelle ausgerichtet (Fig. 8). Die Dicke der Platte 230 ist so bemessen, dass sich bei schräger Durchstrahlung und zweifachem Durchtritt insgesamt eine  $\lambda/2$ -Verzögerung ergibt. Als Besonderheit kommt noch hinzu, dass eine evtl. Verzögerung durch die Spiegelschicht in die Auslegung der doppelbrechenden Zellen aufgenommen ist. Damit bewirkt jede Zelle bei zweifachem Durchtritt eine Drehung der Polarisationsrichtung in die Richtung des genannten Radius. Die reflektierte Ausgangsstrahlung 291 ist somit radial polarisiert.

Die in Fig. 6 gezeigte Teilfigur 6-5 zeigt schematisch diesen Effekt. Im runden Querschnitt des Strahlungsbündels sind radial verlaufende

Striche g zeigt, die die lokal vorliegende Polarisationsvorzugsrichtung der Teilstrahlungsbündel repräsentieren. Teilfigur 6-6 zeigt die Verhältnisse bei tangentialer Ausgangspolarisation.

- 5 Die Rasterung mit hexagonalen Zellen ist nur ein Ausführungsbeispiel. Andere Rasterungen, insbesondere auch fächerartige Sektoreneinteilungen der Zellen, sind sinnvoll möglich.

- 10 Wenn die kristallographischen Hauptachsen der doppelbrechenden Zellen parallel zur Oberfläche liegen, ist die Verzögerungswirkung vor und nach der Reflexion am Spiegel 212 gleich, d.h. die Polarisationswirkung auf einen einfallenden Jones-Vektor  $E_i$  ergibt sich im Eigensystem des Spiegels (sp-System) zu

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = J_z J_s J_z \begin{pmatrix} E_x^i \\ E_y^i \end{pmatrix} \quad (1)$$

- 15 mit der diagonalen Jonesmatrix des Spiegels

$$J_s = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \exp\{i\beta\} \end{pmatrix} \quad (2)$$

und der Jones-Matrix der Zelle (des Verzögerungsbereiches)

$$J_z = \begin{pmatrix} \cos^2 \varphi + \exp\{i\alpha\} \sin^2 \varphi & \cos \varphi \sin \varphi (1 - \exp\{i\alpha\}) \\ \cos \varphi \sin \varphi (1 - \exp\{i\alpha\}) & \sin^2 \varphi + \exp\{i\alpha\} \cos^2 \varphi \end{pmatrix} \quad (3)$$

- 20 Eine eventuelle polarisierende Wirkung des Spiegels (Reflektivitätsunterschied für s- und p-Polarisation) kann natürlich nicht durch die doppelbrechenden Zellen kompensiert werden. Diese wirken nur auf die Phase.

- 25 Eine Auswertung der Gleichungen 1 – 3 für einfallende lineare-x-Polarisation zeigt, dass durch eine geeignete Parameterkombination ( $\varphi$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ) jeder beliebige Ausgangspolarisationszustand generiert werden kann.

Dabei repräsentiert  $\beta$  die Verzögerung des Spiegels,  $\alpha$  die Verzögerung der transmittierenden Platte und  $\varphi$  die Orientierung der kristallografischen Hauptachse in der Ebene.

- 5 Um Störungen durch die Zellgrenzen bei schrägem Einfall zu vermeiden, sollte die doppelbrechende Schicht möglichst dünn sein (z.B. einige  $\mu\text{m}$ ). Werden die doppelbrechenden Zellen aus  $\text{MgF}_2$  gefertigt, so beträgt mit  $\Delta n = 0,009$  die notwendige Dicke, um eine  $\lambda/4$ -Platte unter  $45^\circ$  bei  $\lambda = 193 \text{ nm}$  zu realisieren, ca.  $10 \mu\text{m}$ .

10

Anhand von Fig. 9 wird eine weitere Ausführungsform einer reflektiven Verzögerungsanordnung 300 mit ortsauflösend variierender Verzögerungswirkung erläutert. Die Verzögerungsanordnung 30 umfasst ein Spiegelsubstrat 301, das aus einem Material mit geringem thermischen

- 15 Ausdehnungskoeffizienten besteht, beispielsweise aus dem unter der Marke ZERODUR® bekannten Glaskeramik oder einem anderen Material mit geringem thermischen Ausdehnungskoeffizienten. Auf eine optisch ebene Substratoberfläche 302 ist ein hochreflektierendes, dielektrisches Mehrlagen-Reflexschichtsystem 310 durch Bedampfen  
20 aufgebracht. Die Reflexionsbeschichtung 310 ist eine anisotrope Beschichtung, bei der die einzelnen dielektrischen Einzelschichten annähernd als  $\lambda/2$ -Schichten mit unterschiedlichen Brechungsindizes ausgelegt sind. Durch schräge Bedampfung (typische Bedampfungswinkel von  $40^\circ$  oder mehr) haben die Materialien der Einzelschichten  
25 strukturbedingt eine polarisationsabhängige Brechzahl. Durch den Beschichtungsprozess wurde mit Hilfe geeigneter Maskierungstechniken eine örtliche Variation der Anisotropie innerhalb der Reflexionsbeschichtung erzeugt, so dass nebeneinander liegende Bereiche 360, 361, 362 mit unterschiedlicher polarisationsoptischer Wirkung vorliegen. Dadurch  
30 entsteht über den Nutzquerschnitt der Verzögerungsanordnung 300 eine örtliche Variation der Verzögerungswirkung, die dazu genutzt werden

kann, über den Querschnitt des reflektierten Strahlungsbündels eine gewünschte Polarisationszustandsverteilung einzustellen.

Bei der in Fig. 10 gezeigten Ausführungsform ist die reflektive Verzögerungsanordnung 400 als dielektrisch verstärkter Metallspiegel ausgelegt. Dieser umfasst ein Spiegelsubstrat 401, auf dessen Substratoberfläche 402 eine wenige 100 nm dünne Aluminiumschicht 405 durch Bedampfen, Sputtern oder auf andere Weise aufgebracht ist. Zur Verstärkung der breitbandigen Reflexionswirkung der Metallschicht 405 ist ein dielektrisches Mehrschichtsystem 408 aufgebracht, das gemeinsam mit der Metallschicht 405 die Reflexionsbeschichtung 410 bildet. Das dielektrische Mehrschichtsystem 408 ist analog zur in Fig. 9 gezeigten Ausführungsform als anisotrope Beschichtung mit nebeneinanderliegenden Verzögerungsbereichen 460, 461, 462 unterschiedlicher Verzögerungswirkung ausgelegt, wobei auch hier die lokalen Unterschiede der Polarisierung und optischen Wirkungen durch Unterschiede bei der Anisotropie der Beschichtung erzeugt werden.

Spiegel mit ortsabhängig variierender Verzögerungswirkung der in den Figuren 9 und 10 gezeigten Art können beispielsweise als ebene Umlenkspiegel in einem Projektionsobjektiv oder in einem Beleuchtungssystem einer Mikrolithografie-Projektionsbelichtungsanlage eingesetzt werden, beispielsweise als 90°-Umlenkspiegel 28 innerhalb eines Beleuchtungssystems 4 mit gefaltetem Strahlengang (Fig. 1).

Zur näheren Erläuterung ist in Fig. 11 schematisch ein DUV-Beleuchtungssystem 500 gezeigt, das in der Anlage gemäß Fig. 1 verwendet werden kann. Das Beleuchtungssystem hat eine Pupillenformungseinheit 501, die das vom Laser 502 kommende Licht empfängt und die Form- und Strahlwinkelverteilung der Strahlung derart umformt, dass in einer Pupillenformungsfläche 503 eine gewünschte zweidimensionale Intensitätsverteilung der Strahlung vorliegt. Durch geeignete, computer-



gesteuerte Einstellung der optischen Komponenten innerhalb der Pupillenformungseinheit 503 können alle gängigen zweidimensionalen Beleuchtungslichtverteilungen in der Pupillenformungsfläche 503 eingestellt werden, beispielsweise konventionelle Beleuchtungen

5 unterschiedlicher Durchmesser, annulare Settings oder polare Settings, wie Dipol- oder Quattrupolsetting. Die Pupillenformungsfläche 503 ist eine Pupillenfläche des Beleuchtungssystemes. In der Nähe oder in der Pupillenformungsfläche 503 ist eine zweidimensionale Rasteranordnung

10 504 von refraktiven Rasterelementen angeordnet, die insgesamt eine rechteckige Abstrahlcharakteristik hat, einen Großteil des Lichtleitwertes des Beleuchtungssystemes erzeugt und den Lichtleitwert über eine nachfolgende Einkoppeloptik 505 an die gewünschte Feldgröße in einer nachfolgenden Feldebene 506 des Beleuchtungssystemes anpasst. Die Pupillenformungsfläche 503 ist eine Fourier-transformierte Ebene zur

15 nachfolgenden Feldebene 506, so dass die räumliche Intensitätsverteilung in der Pupillenformungsfläche in eine Winkelverteilung in der Feldfläche 506 transformiert wird.

In der Feldebene 506 liegt die rechteckige Eintrittsfläche eines

20 stabförmigen Lichtintegrators 510, der aus synthetischem Quarzglas oder Kalziumfluorid gefertigt ist und das durchtretende Licht durch mehrfache innere Reflexion mischt und dabei derart homogenisiert, dass in der Austrittsfläche des Stabintegrators eine weitgehend homogene Intensitätsverteilung vorliegt, deren Winkelverteilung der

25 Winkelverteilung an der Eintrittsfläche des Stabintegrators entspricht. Unmittelbar an der Austrittsfläche des Stabintegrators liegt eine Zwischenfeldebene 520, in der ein Retikel-Masking-System (REMA) 521 angeordnet ist, welches als verstellbare Feldblende dient. Das nachfolgende Abbildungsobjektiv 530 bildet die Zwischenfeldebene 520

30 mit dem Maskierungssystem 521 in die Retikelebene (Maskenebene) 540 ab, die gleichzeitig die Objektebene des nachfolgenden Projektionsobjektivs ist. Das Objektiv 530 enthält eine erste

Linsengrupp 531, eine Pupillenzwischenebene 532, in die Filter oder Blenden eingebracht werden können, eine zweite und eine dritte Linsengruppe 533, 534 und einen dazwischen liegenden ebenen Umlenkspiegel 550, der im Bereich weitgehend kollimierter Strahlung in der Nähe der Pupillenfläche 532 angeordnet sein kann und der es ermöglicht, die große Beleuchtungseinrichtung horizontal einzubauen und das Retikel waagrecht zu lagern.

Bei einer anderen, ebenfalls in Fig. 11 gezeigten Ausführungsform ist das Beleuchtungssystem ohne gesondertes Lichtmischelement, d.h. ohne Integratorstab oder Wabenkondensor aufgebaut. In diesem Fall fällt die Feldebene 506 hinter der Einkoppeloptik 505 mit der Ebene des Retikel-Masking-Systems 521 zusammen oder wird durch eine geeignete Relais-Optik überbrückt. Bei dieser Ausführungsform kann ein geeignet ausgelegtes Rasterelement vom Typ des Rasterelementes 504 so modifiziert sein, dass in der Feldebene 506 bereits ausreichend homogenisierte Strahlungsintensität vorliegt.

Die optischen Komponenten des Beleuchtungssystems zwischen der Laserquelle 502 und der Objektebene 520 des Objektivs 530 können weitgehend polarisationserhaltend arbeiten, so dass die in das Objektiv 530 eintretende Strahlung im wesentlichen über den gesamten Querschnitt linear polarisiert ist (Teilfigur 11-1). Da eine solche Polarisation für die Beleuchtung des Retikels ungünstig sein und strukturellrichtungsabhängige Abbildungseigenschaften einführen kann, ist der Umlenkspiegel 550 als reflektive Verzögerungsanordnung mit ortsabhängig variierender Verzögerungswirkung ausgelegt, um linear polarisiertes Eingangslicht in tangential polarisiertes Ausgangslicht (Teilfigur 11-2) umzuwandeln. Der Aufbau des Umlenkspiegels 550 kann dem Aufbau des Umlenkspiegels 210 gemäß Fig. 6 entsprechen, weshalb auf die dortige Beschreibung Bezug genommen wird.

Sollten die im Lichtweg vor dem Umlenkspiegel liegenden optischen Komponenten insgesamt eine polarisationsverändernde Wirkung haben, so dass die auf den Umlenkspiegel einfallende Strahlung keine über den Querschnitt des Strahlungsbündels einheitliche Polarisation hat, so kann  
5 der Umlenkspiegel 550 auch so ausgelegt sein, dass diese Polarisationsvariationen über den Querschnitt kompensiert werden.

Anhand der Figuren 12 und 13 wird erläutert, dass die Erfindung auch in Projektionsbelichtungsanlagen benutzbar ist, die mit Strahlung aus dem  
10 extremen Ultraviolettbereich (EUV) arbeiten. Fig. 12 zeigt hierzu beispielhaft ein Projektionssystem 600, dessen Aufbau in der Patentanmeldung US 2003/0099034 A1 der Anmelderin beschrieben ist. Der Offenbarungsgehalt dieser Patentanmeldung wird durch  
15 Bezugnahme zum Inhalt dieser Beschreibung gemacht. Das Projektionsobjektiv dient dazu, ein in seiner Objektebene 602 angeordnetes Muster eines reflektiven Retikels in eine parallel zur Objektebene ausgerichtete Bildebene 603 in reduziertem Maßstab abzubilden, beispielsweise im Verhältnis 4:1. Die Arbeitswellenlänge  
20 liegt bei ca. 13,4 nm. Zwischen der Objektebene und der Bildebene sind insgesamt sechs mit gekrümmten Spiegelflächen versehene und dadurch abbildende Spiegel 604 bis 609 derart coaxial zueinander angeordnet, dass sie eine gemeinsame optische Achse 610 definieren,  
25 die senkrecht auf der Bildebene und der Objektebene steht. Die Spiegelsubstrate haben die Form rotationssymmetrischer Asphären, deren Symmetrieachsen mit der gemeinsamen mechanischen Achse 10 zusammenfallen. Bei der Abbildung wird ein reelles Zwischenbild 511 erzeugt, so dass das Projektionsobjektiv zwei Pupillenflächen hat, wovon eine in der Nähe des Spiegels 605 und eine zweite in der Nähe  
30 des Spiegels 609 liegt. Alle reflektierenden Flächen der Spiegel 604 bis 609 sind mit Mehrlagen-Reflexbeschichtungen belegt, die eine Vielzahl von Wechschichtpaaren mit Einzelschichten aus Silizium und Molybdän umfassen.

Der Konkavspiegel 609 ist als reflektive Verzögerungsanordnung mit einer über den Nutzquerschnitt lokal variierenden Verzögerungswirkung ausgelegt. Er ist in aneinander grenzende kleine Verzögerungsbereiche eingeteilt, die die Spiegelfläche lückenlos überdecken. Die Verzögerungsbereiche können beispielsweise Sechseckform oder Kreissegmentform haben.

In Fig. 13 ist ein schematischer Schnitt durch den Konkavspiegel 609 gezeigt. Auf einem Spiegelsubtrat 620 aus Silizium ist ein Mehrlagenspiegelschichtsystem 621 aufgebracht, das aus abwechselnden Einzelschichten aus Molybdän und Silizium aufgebaut ist, die das Spiegelsubtrat durchgehend überdecken. Das Spegelschichtsystem 621 ist mit einem dünneren, strukturierten Multischichtspiegel 622 belegt. Der als diffraktive Struktur wirkende, strukturierte Bereich 622 umfasst eine Vielzahl parallel zueinander angeordneter Stege 623, 624, die jeweils als Mo-Si-Wechselschichtpaket aufgebaut sind. Die Stege bilden eine periodische Gitterstruktur mit einer Periodizitätslänge 625, die im Beispielsfall 13 nm beträgt und damit geringfügig unterhalb der Arbeitswellenlänge der Ultraviolett-Strahlung (13,5 nm) liegt. Im Beispielsfall haben die Strukturen des Gitters 622 insgesamt 42 Einzelschichten, während die Spiegelschicht 621 insgesamt 84 Schichten umfasst. Die geometrischen Schichtdicken betragen ca. 2,478 nm für die Mo-Einzelschichten und 4,406 nm für die Si-Einzelschichten. (Periode 13 nm).

Durch die inhomogene Materialverteilung im Bereich der diffraktiven Struktur 622 besitzt das durch die Stege gebildete Zero-Order-Gitter eine polarisationsabhängige Phasentransmission. Damit wird die Phase des reflektierten Lichts polarisationsabhängig, so dass der Spiegel in jedem seiner Verzögerungsbereiche wie ein Retarder wirkt. Eine Simulation der Phasendifferenz für ein parallel (TE) und eine senkrecht

(TM) zu den Gitterstrukturen polarisiertes elektrisches Feld bei senkrechtem Lichteinfall zeigt bei absolutphasen von ca.  $-0,024\lambda$  für die TE-Polarisation und  $-0,034\lambda$  für die TM-Polarisation eine Phasendifferenz von  $\lambda/100$ . Die Reflektivität für beide Polarisationsrichtungen ist  
5 dagegen nahezu identisch (73,7% für TE und 73,6% für TM-Polarisation).

Die lokale Variation der doppelbrechenden Wirkung innerhalb der strukturierten Oberfläche 622 kann auf verschiedene Weise realisiert  
10 sein. Beispielsweise ist es möglich, dass die diffraktiven Strukturen innerhalb der Oberfläche eine konstante Strukturtiefe (Höhe der Stege 623, 624, 625) aber eine lokal variierenden Füllfaktor haben. Der Füllfaktor kann z.B. durch Veränderung der Strukturbreite (Breite der Stege 623, 624) bei konstant gehaltener Periode 625 variiert werden. Es  
15 ist auch möglich, innerhalb der strukturierten Oberfläche einen konstanten Füllfaktor, aber variierende Strukturtiefen vorzusehen. Die lokale Doppelbrechungswirkung kann der Polarisationsverteilung der Eingangsstrahlung so angepasst sein, dass die auf die Bildebene 603 auffallende Strahlung im wesentlichen einheitlich polarisiert ist.

-----

Patentansprüche

1. Verzögerungsanordnung zur Umwandlung eines von einer Eingangsseite der Verzögerungsanordnung auftreffenden Eingangsstrahlungsbündels in ein Ausgangsstrahlungsbündel, welches über seinen Querschnitt eine durch die Verzögerungsanordnung beeinflussbare räumliche Verteilung von Polarisationszuständen aufweist, die sich von der räumlichen Verteilung von Polarisationszuständen der Eingangsstrahlung unterscheidet, wobei die Verzögerungsanordnung als reflektive Verzögerungsanordnung ausgebildet ist und ein Nutzquerschnitt der Verzögerungsanordnung eine Vielzahl von Verzögerungsbereichen unterschiedlicher Verzögerungswirkung hat.
2. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 1, die mindestens ein transparentes doppelbrechendes Transmissionselement und einen Spiegel mit einer Spiegelfläche umfasst, die an einer der Eintrittsseite der Verzögerungsanordnung gegenüber liegenden Seite des Transmissionselementes derart angeordnet ist, dass die Eingangsstrahlung nach einem ersten Durchtritt durch das Transmissionselement für einen zweiten Durchtritt durch das Transmissionselement rückreflektiert wird.
3. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 2, bei der die Spiegelfläche unmittelbar an einer der Eintrittsseite der Verzögerungsanordnung gegenüberliegenden Austrittsseite des Transmissionselementes angeordnet ist.
4. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 2, bei der zwischen einer Austrittsfläche des Transmissionselementes und der Spiegelfläche ein Abstand besteht.

5. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 2, bei der der Spiegel ein Konkavspiegel ist.
6. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 5, bei der das Transmissionselement eine dem Konkavspiegel angepasste gekrümmte Form hat.
7. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 2, bei der Reflexionseigenschaften der Spiegelfläche so ausgelegt sind, dass ein Reflexionsgrad und/oder eine phasenverzögernde Wirkung für senkrecht und parallel zu einer Einfallsebene polarisierte Strahlung im wesentlichen gleich sind.
8. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 2, bei der eine Verzögerungswirkung des Spiegels derart an Verzögerungseigenschaften des Transmissionselementes angepasst ist, um insgesamt die gewünschte, ortsabhängig variierende Verzögerungswirkung erzielbar ist.
9. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 2, bei der das doppelbrechende Transmissionselement eine Vielzahl von nebeneinander angeordneten Verzögerungsbereichen aus transparentem doppelbrechenden Material hat, wobei jeder der Verzögerungsbereiche eine axiale Dicke und eine in einem bestimmten Neigungswinkel zu einer Durchstrahlungsrichtung liegende kristallografische Hauptachse hat, wobei die axiale Dicke und der Neigungswinkel zur Erzeugung eines vorgebbaren Gangunterschiedes zwischen senkrecht zueinander ausgerichteten Feldkomponenten der Strahlung bei zweifachem Durchtritt durch das Verzögerungselement ausgelegt sind.

10. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 9, bei der die kristallografischen Hauptachsen der Verzögerungsbereiche in verschiedenen Richtungen senkrecht zu einer optischen Achse der Verzögerungsanordnung ausgerichtet sind.
11. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 2, bei der mindestens ein doppelbrechendes Transmissionselement vorgesehen ist, das eine kristallografische Hauptachse und eine axiale Dicke hat, wobei ein Nutzquerschnitt der Verzögerungsanordnung in eine Vielzahl von Verzögerungsbereichen aufgeteilt ist, die so ausgebildet sind, dass die Durchtrittsrichtung der Strahlung durch das doppelbrechende Transmissionselement in dem Verzögerungsbereich derart schief zur Richtung der kristallografischen Hauptachse des Verzögerungsbereiches verläuft, dass die Durchtrittsrichtung mit der kristallografischen Hauptachse einen Neigungswinkel von mehr als  $0^\circ$  und weniger als  $90^\circ$  einschließt und in einer durch die Durchtrittsrichtung und die Richtung der kristallografischen Hauptachse aufgespannten Durchtrittsebene liegt, wobei für den mindestens einen Verzögerungsbereich die axiale Dicke und der Neigungswinkel derart aneinander angepasst sind, dass eine optische Weglängendifferenz der Feldkomponenten in dem Verzögerungsbereich nach zweifachem Durchtritt durch das Verzögerungselement einem vorgegebenen Gangunterschied entspricht und die Orientierung der Durchtrittsebene für jeden Verzögerungsbereich so eingestellt ist, dass sich die für den Verzögerungsbereich lokal gewünschte Polarisationsvorzugsrichtung ergibt.
12. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 11, bei der ein doppelbrechendes Transmissionselement mit einer im wesentlichen parallel zu einer optischen Achse der Verzögerungseinrichtung ausgerichteten kristallografischen Hauptachs vorgesehen ist



und dem doppelbrechenden Transmissionselement für jeden Verzögerungsbereich mindestens eine ablenkende Struktur zugeordnet ist, die die Eingangsstrahlung so ablenkt, daß diese mit dem für den Verzögerungsbereich vorgesehene Neigungswinkel und der Neigungsrichtung den Verzögerungsbereich durchdringt.

13. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 12, bei der auf einer Eingangsseite des doppelbrechenden Transmissionselementes ablenkende Strukturen zur Ablenkung der einfallenden Strahlung in die schiefe Durchtrittsrichtung und auf der Austrittsseite des doppelbrechenden Transmissionselementes zugeordnete ablenkende Strukturen zur Rückgängigmachung der Ablenkung vorgesehen sind.
14. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 12, bei der das doppelbrechende Transmissionselement durch eine Platte aus doppelbrechendem Material gebildet ist, wobei die ablenkenden Strukturen direkt auf einer Eintrittsseite und/oder einer Austrittsseite der Platte ausgebildet sind.
15. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 12, bei der mindestens eine ablenkende Struktur eine beugende Struktur ist.
16. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 12, bei der mindestens eine ablenkende Struktur eine brechende Struktur ist.
17. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 12, bei der mindestens eine ablenkende Struktur eine beugende und brechende Struktur ist.
18. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 12, bei der ein Nutzungsquerschnitt der Verzögerungsanordnung in eine Vielzahl von

Verzögerungsbereichen mit konstanter Ablenkung und/oder gleichem Neigungswinkel aufgeteilt ist, die den Nutzquerschnitt der Verzögerungsanordnung im wesentlichen lückenlos ausfüllen.

19. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 11, bei der in einem Nutzquerschnitt mehrere doppelbrechende Transmissions-elemente angeordnet sind, wobei jedes der Transmissions-elemente einen Verzögerungsbereich bildet und eine axiale Dicke hat, bei jedem der doppelbrechenden Transmissions-elemente die kristallografische Hauptachse derart schief gegenüber der Durchtrittsrichtung der Strahlung gekippt ist, daß die kristallografische Hauptachse mit der Durchtrittsrichtung die Durchtrittsebene aufspannt und die kristallographischen Hauptachsen von mindestens zwei der Transmissionselemente unterschiedlich ausgerichtet sind.
20. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 1, die zu Umwandlung von eintretender, im wesentlichen zirkular polarisierter Strahlung in austretende, bereichsweise linear polarisierte Strahlung ausgebildet ist.
21. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 1, die so ausgebildet ist, dass das Ausgangsstrahlungsbündel im wesentlichen tangential oder radial polarisiert ist.
22. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 11, bei der der vorbestimmte Gangunterschied im zweifachen Durchtritt im wesentlichen einem Viertel der Wellenlänge der eintretenden Strahlung entspricht.
23. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 1, die zur Umwandlung von eintretender, über einen gesamten Querschnitt in einer Richtung

linear polarisierter Strahlung in austretende, bereichsweise linear polarisierte Strahlung ausgebildet ist, die tangential oder radial polarisiert ist.

24. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 11, bei der der vorbestimmte Gangunterschied im zweifachen Durchtritt im wesentlichen einer halben Wellenlänge der eintretenden Strahlung entspricht.
25. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 2, bei der das Transmissionselement eine axiale Dicke von mehr als  $100\mu\text{m}$  aufweist.
26. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 1, bei der die Verzögerungsbereiche eine polygonale Form haben.
27. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 1, bei der ein Nutzquerschnitt in kleine Verzögerungsbereiche mit gleicher Größe und/oder Form aufgeteilt ist,
28. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 1, bei der eine Anzahl der Verzögerungsbereiche in der Größenordnung von 10 oder 100 oder darüber liegt.
29. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 1, mit einem Substrat und einer an dem Substrat angeordnete Reflexionsbeschichtung, wobei die Reflexionsbeschichtung zur Bildung von Verzögerungsbereichen unterschiedlicher Verzögerungswirkung eine lokal variierende, polarisationsverändernde Reflexionswirkung hat.
30. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 29, bei der die Reflexionsbeschichtung als anisotrope Reflexionsbeschichtung mit

einer örtlichen Variation der Anisotropie der Reflexionsbeschichtung ausgestaltet.

31. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 1, bei der eine örtliche Verteilung der Verzögerungswirkung so ausgelegt ist, dass sich eine effektive Verzögerungsverteilung ergibt, die im wesentlichen rotationssymmetrisch zu einer optischen Achse der Verzögerungsanordnung ist.
32. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 1, bei der eine örtliche Verteilung der Verzögerungswirkung so ausgelegt ist, dass sich eine effektive Verzögerungsverteilung ergibt, die eine in einer Radialrichtung der Verzögerungsanordnung zunehmende oder abnehmende Verzögerungswirkung hat.
33. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 1, bei der eine örtliche Verteilung der Verzögerungswirkung so ausgelegt ist, dass sich eine effektive Verzögerungsverteilung ergibt, die nicht-rotationssymmetrisch ist.
34. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 33, bei der die nicht-rotationssymmetrische Verzögerungsverteilung in bezug auf eine optische Achse der Verzögerungsanordnung eine mehrzählige Symmetrie aufweist.
35. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 1, bei der die Verzögerungsanordnung ein Substrat und eine an dem Substrat angebrachte, für Strahlung aus dem extremen Ultraviolettbereich (EUV) wirksame Reflexionsbeschichtung hat, die zur Bildung von Verzögerungsbereichen unterschiedlicher Verzögerungswirkung eine lokal unterschiedliche polarisationsveränderte Reflexionswirkung hat.

36. Verzögerungsanordnung nach Anspruch 35, bei der die Reflexionsbeschichtung als Mehrlagen-Reflexbeschichtung mit übereinanderliegenden Schichten mit abwechselnd hochbrechendem und niedrigbrechenden Materialien ausgebildet sein, wobei diffraktive Strukturelemente von mit Abstand nebeneinander verlaufenden Strukturen vorgesehen ist, wobei der Abstand kleiner als die Wellenlänge der Strahlung ist und eine Anordnung der Strukturen zur Bildung von Verzögerungsbereichen unterschiedlicher Verzögerungswirkung lokal variiert.
37. Mikrolithographie-Projektionsbelichtungsanlage mit einer Strahlungsquelle umfassenden Beleuchtungseinrichtung zur Beleuchtung einer Maske sowie mit einem der Beleuchtungseinrichtung nachgeschalteten Projektionsobjektiv zur Abbildung eines von der Maske bereitgestellten Musters in eine Bildebene des Projektionsobjektives, wobei die Projektionsbelichtungsanlage mindestens eine Verzögerungsanordnung zur Umwandlung eines von einer Eingangsseite der Verzögerungsanordnung auftreffenden Eingangsstrahlungsbündels in ein Ausgangsstrahlungsbündel aufweist, welches über seinen Querschnitt eine durch die Verzögerungsanordnung beeinflussbare räumliche Verteilung von Polarisationszuständen aufweist, die sich von der räumlichen Verteilung von Polarisationszuständen der Eingangsstrahlung unterscheidet, wobei die Verzögerungsanordnung als reflektive Verzögerungsanordnung ausgebildet ist und ein Nutzquerschnitt der Verzögerungsanordnung eine Vielzahl von Verzögerungsbereichen unterschiedlicher Verzögerungswirkung hat.

38. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 37, bei der die Verzögerungsanordnung als Umlenkspiegel ausgebildet und zwischen der Strahlungsquelle und der Maske in der Beleuchtungseinrichtung angeordnet ist.
39. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 37, bei der die Verzögerungseinrichtung in Strahlungsflußrichtung hinter einem letzten polarisierenden optischen Element angeordnet ist.
40. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 37, bei der das Projektionsobjektiv ein katadioptrisches Projektionsobjektiv ist, bei dem zwischen der Objektebene und der Bildebene mindestens ein katadioptrischer Objektivteil mit einem Konkavspiegel und einer Strahlumlenkeinrichtung angeordnet ist, wobei der Konkavspiegel als reflektive Verzögerungsanordnung ausgebildet ist und ein Nutzquerschnitt des Konkavspiegels eine Vielzahl von Verzögerungsbereichen unterschiedlicher Verzögerungswirkung hat.
41. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 40, bei der die Verzögerungsanordnung mindestens ein transparentes doppelbrechendes Transmissionselement und einen Spiegel mit einer Spiegelfläche umfasst, die an einer der Eintrittsseite der Verzögerungsanordnung gegenüber liegenden Seite des Transmissionselementes derart angeordnet ist, dass die Eingangsstrahlung nach einem ersten Durchtritt durch das Transmissionselement für einen zweiten Durchtritt durch das Transmissionselement rückreflektiert wird, wobei das doppelbrechende Transmissionselement eine Vielzahl von nebeneinander angeordneten Verzögerungsbereichen aus transparentem doppelbrechenden Material hat, wobei jeder der Verzögerungsbereiche eine axiale Dicke und eine in einem bestimmten Neigungswinkel

zu einer Durchstrahlungsrichtung liegende kristallografische Hauptachse hat, wobei die axiale Dicke und der Neigungswinkel zur Erzeugung eines vorgebbaren Gangunterschiedes zwischen senkrecht zueinander ausgerichteten Feldkomponenten der Strahlung bei zweifachem Durchtritt durch das Verzögerungselement ausgelegt sind.

42. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 41, bei der die kristallografischen Hauptachsen der Verzögerungsbereiche in verschiedenen Richtungen senkrecht zu einer optischen Achse der Verzögerungsanordnung ausgerichtet sind.

43. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 41, bei der mindestens ein doppelbrechendes Transmissionselement vorgesehen ist, das eine kristallografische Hauptachse und eine axiale Dicke hat, wobei ein Nutzquerschnitt der Verzögerungsanordnung in eine Vielzahl von Verzögerungsbereichen aufgeteilt ist, die so ausgebildet sind, dass die Durchtrittsrichtung der Strahlung durch das doppelbrechende Transmissionselement in dem Verzögerungsbereich derart schief zur Richtung der kristallografischen Hauptachse des Verzögerungsbereiches verläuft, dass die Durchtrittsrichtung mit der kristallografischen Hauptachse einen Neigungswinkel von mehr als  $0^\circ$  und weniger als  $90^\circ$  einschließt und in einer durch die Durchtrittsrichtung und die Richtung der kristallografischen Hauptachse aufgespannten Durchtrittsebene liegt, wobei für den mindestens einen Verzögerungsbereich die axiale Dicke und der Neigungswinkel derart aneinander angepasst sind, dass eine optische Weglängendifferenz der Feldkomponenten in dem Verzögerungsbereich nach zweifachem Durchtritt durch das Verzögerungselement einem vorgegebenen Gangunterschied entspricht und die Orientierung der Durchtrittsebene für jeden Verzögerungsbereich

so eingestellt ist, dass sich die für den Verzögerungsbereich lokal gewünschte Polarisationsvorzugsrichtung ergibt.

44. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 41, bei der ein doppelbrechendes Transmissionselement mit einer im wesentlichen parallel zu einer optischen Achse der Verzögerungseinrichtung ausgerichteten kristallografischen Hauptachse vorgesehen ist und dem doppelbrechenden Transmissionselement für jeden Verzögerungsbereich mindestens eine ablenkende Struktur zugeordnet ist, die die Eingangsstrahlung so ablenkt, daß diese mit dem für den Verzögerungsbereich vorgesehene Neigungswinkel und der Neigungsrichtung den Verzögerungsbereich durchdringt.
45. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 37, bei der das Projektionsobjektiv ein katadioptrisches Projektionsobjektiv ist, bei dem zwischen der Objektebene und der Bildebene mindestens ein ebener Umlenkspiegel angeordnet ist, wobei der Umlenkspiegel als reflektive Verzögerungsanordnung ausgebildet ist und ein Nutzquerschnitt des Umlenkspiegels eine Vielzahl von Verzögerungsbereichen unterschiedlicher Verzögerungswirkung hat.
46. Projektionsbelichtungsanlage mit einer Strahlungsquelle für extreme Ultraviolettstrahlung (EUV) umfassenden Beleuchtungseinrichtung zur Beleuchtung einer reflektiven Maske sowie mit einem der Beleuchtungseinrichtung nachgeschalteten Projektionsobjektiv zur Abbildung eines von der Maske bereitgestellten Musters in eine Bildebene des Projektionsobjektives, wobei die Projektionsbelichtungsanlage mindestens eine Verzögerungsanordnung zur Umwandlung eines von einer Eingangsseite der Verzögerungsanordnung auftreffenden Eingangsstrahlungsbün-



dels in ein Ausgangsstrahlungsbündel aufweist, welches über seinen Querschnitt eine durch die Verzögerungsanordnung beeinflussbare räumliche Verteilung von Polarisationszuständen aufweist, die sich von der räumlichen Verteilung von Polarisationszuständen der Eingangsstrahlung unterscheidet, wobei die Verzögerungsanordnung als reflektive Verzögerungsanordnung ausgebildet ist und ein Nutzquerschnitt der Verzögerungsanordnung eine Vielzahl von Verzögerungsbereichen unterschiedlicher Verzögerungswirkung hat.

47. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 46, bei der die Verzögerungsanordnung ein Substrat und eine an dem Substrat angebrachte, für Strahlung aus dem extremen Ultraviolettbereich (EUV) wirksame Reflexionsbeschichtung hat, die zur Bildung von Verzögerungsbereichen unterschiedlicher Verzögerungswirkung eine lokal unterschiedliche polarisationsveränderte Reflexionswirkung hat.
  48. Projektionsbelichtungsanlage nach Anspruch 47, bei der die Reflexionsbeschichtung als Mehrlagen-Reflexbeschichtung mit übereinanderliegenden Schichten mit abwechselnd hochbrechendem und niedrigbrechenden Materialien ausgebildet sein, wobei diffraktive Strukturelemente von mit Abstand nebeneinander verlaufenden Strukturen vorgesehen ist, wobei der Abstand kleiner als die Wellenlänge der Strahlung ist und eine Anordnung der Strukturen zur Bildung von Verzögerungsbereichen unterschiedlicher Verzögerungswirkung lokal variiert.
-

Zusammenfassung der Offenbarung

- Eine Verzögerungsanordnung zur Umwandlung eines von einer Eingangsseite der Verzögerungsanordnung auftreffenden Eingangsstrahlungs**5** bündels in ein Ausgangsstrahlungsbündel, welches über seinen Querschnitt eine durch die Verzögerungsanordnung beeinflussbare räumliche Verteilung von Polarisationszuständen aufweist, die sich von der räumlichen Verteilung von Polarisationszuständen der Eingangsstrahlung unterscheidet, ist als reflektive Verzögerungsanordnung ausgebildet. Ein Nutzquerschnitt der Verzögerungsanordnung hat eine **10** Vielzahl von Verzögerungsbereichen unterschiedlicher Verzögerungswirkung. Eine solche Spiegelanordnung mit ortsabhängig variierender Verzögerungswirkung kann zur Kompensation von unerwünschten Schwankungen des Polarisationszustandes über den Querschnitt eines **15** Eingangsstrahlungsbündels und/oder zur Einstellung bestimmter Ausgangspolarisationszustände genutzt werden, z.B. zur Einstellung von radialer oder tangentialer Polarisation.